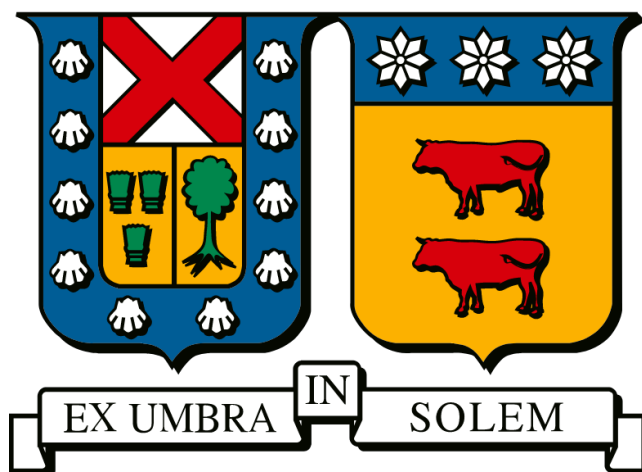


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Valparaíso, Chile



“IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE TECNOLOGÍA PARA CONCENTRAR SALMUERAS DE LITIO Y RECUPERACIÓN DE AGUA, MEDIANTE LA INYECCIÓN DE BURBUJAS DE AIRE SECO”

Elías Manuel Fernández Díaz

Como requisito para optar al título de:
Ingeniero Civil Químico

Profesor Guía:
Dr. Claudio Acuña Pérez

Profesor Correferente:
Dra. Paula Guerra Pinto

Septiembre del 2023

Agradecimientos

Si tengo que agradecer a quienes estuvieron y formaron parte de este camino, tendría que darle las gracias a cada persona que paso, aunque sea para un simple saludo. Creo en la determinación de las acciones, donde cada una nos lleva a un lugar distinto, creando un universo de distintos finales, en donde me encuentro hoy escribiendo estas palabras. Sin embargo, existe gente que ha formado más este final por la presencia e influencia de sus seres en mi vida.

Me encuentro cerrando una de las etapas más importantes de mi vida y miro hacia atrás para ver quienes estuvieron conmigo en todo momento. Primero veo a mis padres que siempre estuvieron a mi lado apoyándome en este proceso de un inicio a fin, gracias por el amor, por la educación y la salud que me han brindado, sin ustedes no sería la persona que soy hoy. Gracias mama por ser mi compañera, por no dejar desviarme del camino del objetivo final, sin ti no estaría acá, eres el soporte más grande que tengo. Gracias a mi papa, por enseñarme a lo que es la ingeniería desde muy pequeño y ayudarme a desarrollarme como tal, por ser mi mayor consejero y enseñarme su sabiduría, te mando un beso al cielo papa, te fuiste en el camino, pero sé que acompañas de otras maneras.

Gracias al equipo de docentes de la escuela de ingeniería civil química de la USM, por ayudarme a cumplir mi sueño, especialmente a mi maestro, el profesor Claudio Acuña por enseñarme a ser un Ingeniero y dejarme muchas lecciones que hoy aplico en mi vida laboral, espero que el proyecto que hemos ejecutado siga escalando y volvernó a encontrarnos en otro.

A mis amigos a cuáles considero mis hermanos, Gabriel, Balmelli, Javiera y todos los del grupo que continuamos juntos desde el colegio, gracias por las risas, el apoyo incondicional en los momentos más complicados. Estamos todos entrando a una nueva etapa de nuestras vidas y estoy ansioso por ver sus logros. A mis amigos y compañeros de universidad, Franco, Gabriella, Marcela y José, que hoy no nos puede acompañar, sin ustedes el estudio se hubiera hecho más difícil, gracias por el apoyo académico y emocional.

A mi familia, especialmente a Katy, que desde el primer día me ayudo a adecuarme a la universidad y a su formato, sin ella me hubiera demorado más en este periodo universitario. Finalmente, a Camila, que se integró a mi vida en este último tramo de este camino, tal vez el más difícil, por ser la compañera de mis sentimientos y de mi día a día.

Índice

Resumen Ejecutivo	8
Introducción	9
Objetivos.....	10
Objetivo General	10
Objetivos Específicos.....	10
Capítulo 1: Mercado del Litio y procesos de Extracción	11
1.1 Reservas de Litio	11
1.2 Mercado del litio	11
1.2.1 Demanda.....	12
1.2.2 Oferta	13
1.2.3 Precio	14
1.3 Procesos Productivo del litio a partir de salmueras.....	15
1.3.1 Proceso productivo convencional	15
1.3.2 Nuevas tecnologías implementadas de extracción directa de litio.....	16
1.4 Crisis hídrica y la industria de litio	20
1.4.1 Evaluación del impacto hídrico de la industria del Litio	20
1.5 Diseño de la tecnología propuesta.....	22
1.5.1 Prototipo	22
1.5.2 Sistema de secado (torre de adsorción)	24
Capítulo 2: Diseño e implementación del equipo piloto.	27
Descripción de materia prima.....	27
□ Silica gel	27
□ Caracterización de la salmuera.....	29
Modelación y evaluación de las variables operacionales en el sistema disecante.....	29
□ Sensibilización.....	31
Diseño propuesto.....	32
□ Sistema de las torres disecantes	33
□ Estanque de evaporación	33
Capítulo 3: Diseño experimental	35
Metodología de trabajo	35
Prueba de concepto.....	36
Comparación frente a la línea base de investigación	37
Evaluación del rendimiento del prototipo.....	37
Capítulo 4: Resultados experimentales y análisis	38
Caracterización de la materia prima.....	38
Curva de quiebre del sistema disecante	40

Equipo experimental	42
Análisis de resultados	44
□ Resultados frente a la línea base de investigación	45
□ Resultados de la evaluación del rendimiento del prototipo.....	46
Capítulo 5: Escalamiento a aplicación industrial	49
Costo de operación.....	52
Costo de equipos.....	55
Flujo de caja	55
□ Cálculo de ingresos	55
□ Cálculo de egresos.....	56
□ Inversión del proyecto en equipos e instalaciones	57
□ Criterios de evaluación del flujo de caja.....	57
Análisis de los indicadores de rentabilidad.....	57
Capítulo 6: Conclusiones recomendaciones	59
Conclusiones	59
Recomendaciones	60
Bibliografía.....	61
Anexo	64

Índice de Figuras

Figura 1: Proceso productivo de Carbonato de Litio (Wilkomirsky, 2009).....	16
Figura 2: Extracción litio por nanofiltración (Lu et al., 2021)	17
Figura 3: Extracción directa de litio mediante adsorción(Zhu et al., 2021).....	18
Figura 4: Extracción de litio por intercambio iónico (Snydacker et al., 2018).....	19
Figura 5: Sistema de propuesto de extracción de litio mediante intercambio iónico (Nishihama et al., 2011).....	20
Figura 6: Área de pozas de evaporación ubicadas en el Salar de Atacama – Chile (Figura extraída de Google Earth – junio 2022)	21
Figura 7: Diagrama de flujo del método del prototipo patentado (Guerra, Acuña, 2021) ..	22
Figura 8: Diagrama de indicadores y equipos del sistema de concentración de salmueras (Guerra, Acuña, 2021)	23
Figura 9: Proceso de Adsorción en la superficie de la partícula adsorbente (Chi Tien, 2019)	24
Figura 10: Adsorbente a validar - Silica Gel	27
Figura 11: Torre de tamices (N° 4, 8, 10, 16, 30, 50)	28
Figura 12: Sistema de adsorción para secado de aire simulado en Aspen Adsorption V9 30	
Figura 13: Diagrama de flujo del prototipo de evaporación asistida mediante burbujas secas	32
Figura 14: Estanque de evaporación de salmueras	34
Figura 15: Dimensiones cuadro de acrílico	34
Figura 16: Estanque de evaporación operando correctamente	36
Figura 17: Sistema de adsorción con sensores de presión (P-101, P-102)	42
Figura 18: Estanque de evaporación implementado	43
Figura 19: Sistema implementado de evaporación de salmueras mediante burbujas secas	43
Figura 20: Diagrama de flujo del escalamiento industrial del prototipo	49
Figura 21: Estanque de evaporación a escala industrial (Equipo de ingeniería, Dpto. IQA, USM)	50

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Destino del litio por industria productiva, 2022 (Brian W. Jaskula, 2013)	12
Gráfico 2: Proyección de demanda del litio 2030 (Salathiel González & Jorge Cantallopts, 2020)	13
Gráfico 3: Cambio en la oferta porcentual mundial de Chile (Brian W. Jaskula, 2013)	14
Gráfico 4: Precio del litio desde 2018 a la fecha (Trading Economics, 2023)	15
Gráfico 5: Granulometría de la silica gel mediante Rosin Rammbler.....	38
Gráfico 6 Isoterma de adsorción de la silica gel mediante el Modelo de Langmuir y Freundlich.....	39
Gráfico 7: Isoterma de adsorción de Freundlich con coeficientes adimensionalizados.....	40
Gráfico 8: Sensibilización del sistema mediante la temperatura - Curva de quiebre	41
Gráfico 9: Sensibilización del sistema mediante la presión - Curva de quiebre	41
Gráfico 10: Resultados experimentales	44
Gráfico 11 Evaluación del prototipo frente a la línea de investigación.....	45
Gráfico 12: Ajuste de las tasas de evaporación del prototipo	46
Gráfico 13: Evaluación del rendimiento del prototipo (T=20°C).....	47
Gráfico 14: Evaluación del prototipo (T=40°C)	48
Gráfico 15: Variación de la temperatura de entrada de la salmuera al estanque de evaporación para una temperatura estable de operación de 20°C.....	51
Gráfico 16: Variación de la temperatura de entrada de la salmuera al estanque de evaporación para una temperatura estable de operación de 40°C.....	52
Gráfico 17: Costo de operacional del prototipo propuesto a escala industrial con reintegración energética con una temperatura de operación de 40 °C y distintos flujos de salmuera.....	53
Gráfico 18 Costo de operacional del prototipo propuesto a escala industrial con reintegración energética con una temperatura de operación de 20 °C y distintos flujos de salmuera.....	53
Gráfico 19: Costo operacional del prototipo propuesto a escala industrial con una temperatura de operación de 20 y 40 °C a un flujo de 1 [m ³ /h] de salmuera y distintas velocidades de inyección de aire	54
Gráfico 20 Tendencia de la producción de litio en Chile.....	56

Índice de Tablas

Tabla 1: Reservas de litio en el mundo y descripción (Salathiel González & Jorge Cantallopts, 2020).....	11
Tabla 2: Composición de salmuera del Salar de Atacama (Igor Wilkomirsky, 2008)	15
Tabla 3: Descripción de los equipos Figura 8	23
Tabla 4: Isotermas de adsorción estudiadas	26
Tabla 5: Condiciones del aire de servicio simulado.....	30
Tabla 6: Descripción de la notación del diagrama de flujo del prototipo	33
Tabla 7: Detalle de la instrumentación de seguridad del sistema disecante	33
Tabla 8 Condiciones operacionales para la validación del prototipo	36
Tabla 9 Características de la salmuera	39
Tabla 10 Ajuste de resultados del prototipo	46
Tabla 11: Rangos de operacionales del flujo de salmuera en prototipo propuesto a escala industrial	52
Tabla 12: Costo de inversión de la tecnología a escala industrial	55
Tabla 13 Resultados de los indicadores de los flujos de caja.....	58

Resumen Ejecutivo

La demanda de litio ha aumentado en un 200% en los últimos 5 años, y se espera un aumento del 700% el 2030. La demanda sostenida, se debe principalmente al requerimiento de baterías de litio para la electromovilidad. A pesar de la oportunidad de mercado con un incremento de precios del 500% (2020-2023), la producción de Litio en Chile se realiza con un proceso de concentración solar en pozas, con alta huella de hídrica. El proceso, se inicia con la extracción de salmueras (0.2% Li) desde el salar de Atacama, las que son concentradas (6%) en pozas solares durante 12 a 18 meses, con tasas de evaporación promedio de 8 [L/m²/día]. A pesar de las ventajas climáticas para evaporar y disponibilidad de salmueras, su extracción no es sostenible dado las pérdidas irreversibles del agua evaporada, con 4 millones de litros por tonelada de carbonato de Litio.

En este contexto, se validó en ambiente real la tecnología UTFSM de evaporación con burbujas secas. Para esto se diseñó e implementó un prototipo de 15 L, en una celda de acero inoxidable con control de temperatura (29 x 50 cm de área transversal), con un sistema inyección de 8 burbujeadores porosos (2 cm Ø x 3 cm largo), con control de flujo de aire, y medición de temperatura. Para la inyección de gas, se montó un sistema de columnas disecantes (3 columnas, 5 cm Ø, y sílica gel comercial de 2.7 mm Ø). Para la validación se considera un diseño experimental con niveles 2 niveles de temperatura de solución (20 y 40 °C) y 3 flujos superficiales de gas (0.6, 1.7, 2.9 [cm/s]). Para escalar el sistema de adsorción de agua se utilizó Aspen Adsorption, ajustado con datos experimentales. Como resultado del piloto, se alcanzaron tasas de evaporación 9 veces la línea base (pozas), con saturación del 68% de las burbujas, usando 40 °C y velocidad de gas de 2.9 [cm/s].

Se realizó el escalamiento industrial para un escenario 53.5 km² en pozas, considerando estanques de 12 m² de fibra de vidrio modular diseñado por un equipo de ingeniería, con un Capex de 30 KUSD. Se consideró una velocidad de aire de 1.7 [cm/s], temperatura de solución de 40 °C, sistema de integración energética y flujo de salmuera de 1 [m³/h] con un OPEX de 8 [USD/m³ agua recuperada].

Para el flujo de caja se consideró una tasa de descuento de 30% en un periodo de 10 años, con 400 estanques, 1 cada 130 mil [m²], con un Capex de 16 MUSD (estanques, sistema disecante, bomba centrífuga, soplador de lóbulos). La evaluación económica arrojó un VAN de -2 MUSD y una TIR del 11% asociado. Se concluye que la tecnología planteada no es viable económicamente con un costo total de agua recuperada de 8 [USD/m³]. No obstante la evaluación NO considera la venta del agua recuperada, lo que haría rentable el proyecto.

Introducción

El litio es un metal ligero, utilizado como componente principal de las baterías ion litio, por su alta densidad energética usadas para la industria de los vehículos eléctricos. En consecuencia, se observa una alta demanda del mineral, duplicándose en los últimos 5 años (2020) (Salathiel González & Jorge Cantallopts, 2020), es por esto que se observa una fuerte alza en su precio, de un 500% en los 3 últimos años desde el 2023 (Trading Economics, 2023). Donde Chile se encuentra en una posición favorable ante este contexto ya que posee la mayor reserva de litio a nivel mundial (36%) (Brian W. Jaskula, 2023) y con una alta concentración, lo que permitiría posicionarse como uno de los mayores productores de litio en el mundo.

La extracción del litio se realiza desde minerales (ej: Espodumena, Keliber Finlandia) o salmueras subterráneas (Salar de Atacama, Jujuy Argentina). Las salmueras de litio (0.2% Litio) se extraen desde perforaciones y son evaporadas en pozas por radiación solar, las cuales se traspasan en forma sucesiva a piscinas de evaporación, con retiro de sales intermedias (Potasio, Magnesio, Boro), alcanzando un 6% de concentración durante un periodo de 12 a 18 meses con tasas de evaporación de 6 a 10 [L/m²/día]. El producto se transporta por camiones aljibe a la planta química para la producción de Li₂CO₃, en el sector La Negra (Wilkomirsky, 2009). A pesar de la oportunidad de mercado la extracción de litio en Chile no es sostenible debido a la huella hídrica de esta industria, estimada en 4 millones de litros de agua por tonelada de Li₂CO₃, de la que no se tiene certeza de recuperar por falta de monitoreo de acuíferos, en una de las zonas más áridas del mundo, con una población en constante crecimiento (INE, 2019).

En consecuencia, la migración de un proceso basado en la concentración en pozas solares a la extracción directa del mineral mediante adsorción y membranas (osmosis reversa y nanofiltración) ha cobrado relevancia en los últimos años, lo que tiene un impacto en la reducción de pérdidas del recurso hídrico por evaporación, infiltración e impregnación, aumentando la eficiencia del proceso a un 70 - 90%, sin embargo, la problemática es la complejidad y variabilidad de la composición de las salmueras extraídas, por lo que una alta presencia de magnesio provoca una reducción de la eficiencia del proceso, sin considerar los costos de inversión y operación requerido para construir una planta de este tipo.

Por lo que se crea la oportunidad para la innovación, focalizada en el estudio de la evaporación acelerada de salmueras mediante la inyección de microburbujas secas con lanzas de punta porosa (INAPI 201903622), disminuyendo los tiempos de operación y recuperación el agua evaporada. El estudio se centra en la implementación y validación de un equipo piloto, con el propósito de elevar el nivel de madurez tecnológica a 5. Se busca comprender el proceso de transferencia de masa de la etapa de adsorción para el secado de aire, como en la interacción entre las burbujas secas y la salmuera a distintas temperaturas.

Para lograr lo anterior se plantean los siguientes objetivos:

Objetivos

Objetivo General

Implementar un equipo de evaporación asistida en ambiente de laboratorio con la finalidad de validar la inyección de microburbujas secas para la concentración y recuperación del agua en salmueras.

Objetivos Específicos

1. Diseñar e Implementar la unidad de secado de aire con herramienta Aspen Adsorption, validado con sílica gel comercial, que permita evaluar efecto de las variables de operación sobre la deshumidificación del aire.
2. Diseñar e implementar un equipo piloto (15 L), para evaluar tasa de evaporación, proyectando el diseño mecánico industrial
3. Evaluar experimentalmente el efecto de las condiciones operacionales: velocidad superficial y temperatura de salmuera sobre la tasa de evaporación en la unidad piloto
4. Proyectar y evaluar la prefactibilidad técnica-económica del escalamiento industrial del prototipo optimizado.

Capítulo 1: Mercado del Litio y procesos de Extracción

1.1 Reservas de Litio

El creciente interés por el uso del material para una industria motriz más limpia y creación de nuevas energías renovables ha generado un gran interés en encontrar yacimientos con altas concentraciones de litio para su explotación.

A continuación, en la tabla 1 se describen los principales depósitos naturales y yacimientos de litio en el mundo. Existen 3 tipos: desde mineral de roca o pegmatitas en forma de espodumeno, salmueras (provenientes de salares) y rocas sedimentarias. Donde la mayor reserva se encuentra en el Triángulo del Litio conformado por Chile, Argentina y Bolivia.

Tabla 1: Reservas de litio en el mundo y descripción (Salathiel González & Jorge Cantallopts, 2020)

Tipo	Tipos de depósitos	Participación a nivel mundial	Estado natural	Ubicación mayores depósitos
Pegmatitas	Espodumeno, petalitas, lepidolitas, amblogonita y eucryptita	26%	Roca dura (a partir de magma cristalizado bajo la superficie terrestre)	Australia, EE. UU., RDC, Canadá
Salmueras	Continetales (salaros), geotermalos y petroleros	66%	Salmueras (arenas, agua y sales minerales)	Triángulo del litio (Chile, Argentina, Bolivia)
Rocas sedimentarias	Arcillas, toba volcánica, rocas evaporitas lacustres	8%	Rocas minerales de esmectita (arcilla), jadarita (evaporita lacustre).	EE. UU., México, Serbia (Jadar), Perú (Falchani)

Como se puede observar Chile posee significativas reservas, obteniendo una ventaja comparativa para el suministro mundial del valioso recurso con la capacidad de posicionarse como el mayor productor del metal ligero.

1.2 Mercado del litio

El mercado del litio ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas debido a su gran demanda en la fabricación de grasas o lubricantes, aplicaciones farmacéuticas, baterías recargables y especialmente la creciente conciencia sobre la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la transición hacia fuentes de energía renovable han impulsado la demanda de vehículos eléctricos, lo que a su vez ha generado que la demanda de litio totalmente proporcional a esta industria. Este auge ha provocado una competencia creciente entre los principales productores de litio en

el mundo, como Australia, Chile, Argentina y China (Salathiel González & Jorge Cantallopts, 2020).

Como se puede observar (Gráfico 1), el principal destino de la producción de litio es la fabricación de baterías, que abarca el 80% del consumo mundial el cual ha ido en un constante crecimiento desde años anteriores como en el 2018 con un 56% destinada a dicha industria (Brian W. Jaskula, 2019). Debido a que los gobiernos de las potencias mundiales han promovido políticas públicas e inversiones para la descarbonización del transporte con cero emisiones, como lo es el caso de China, distintos estados de Estados Unidos como California y algunos países presentes en el Acuerdo de París, donde se han comprometido a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero para 2030, y la transición hacia vehículos eléctricos es una de las medidas para lograrlo (Agencia Internacional de Energía, 2021)

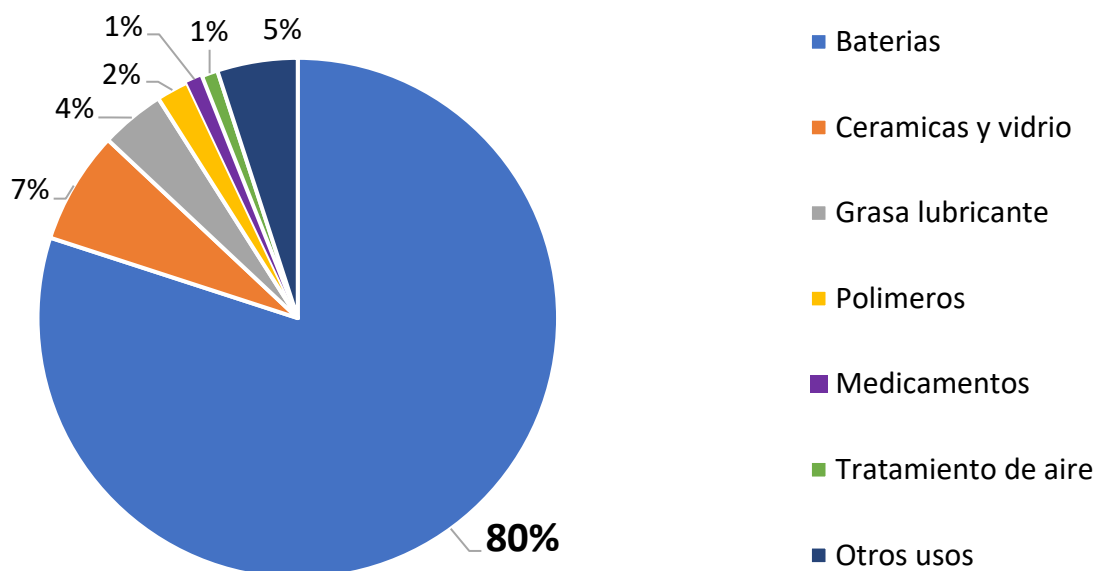


Gráfico 1: Destino del litio por industria productiva, 2022 (Brian W. Jaskula, 2013)

Frente a esta necesidad, los productores de litio se enfrentan a distintos desafíos como generar una industria sostenible y solventar la alta demanda del mineral mediante el desarrollo de nuevas tecnologías que sean más eficiente y económicamente viable.

1.2.1 Demanda

El principal demandante de este mineral es China, con el 55% del consumo mundial del litio, debido a su gran industria de producción de baterías ion – litio, con un 80% de la producción mundial de este producto (Salathiel González & Jorge Cantallopts, 2021).

La demanda del litio surge por la necesidad del uso de esta materia prima para algún tipo de producto. En este caso, existen dos principales usos para el litio: usos tradicionales como

modificar las propiedades algunos artículos como vidrio, grasas, productos farmacéuticos, etc. y como batería recargable de ion-litio, utilizadas para el almacenamiento de energía que se ocupa para artículos electrónicos y electro-movilidad, donde los vehículos eléctricos son los protagonistas de la demanda de este mineral, ya que la idea de cambiar la forma de transporte a una más sustentable, no contaminante crece cada día (Salathiel González & Jorge Cantallopts, 2020). Debido a este crecimiento se obtienen las proyecciones de demanda de litio para el 2030 con un crecimiento de un 700% desde el 2019 (Grafico 2), siendo totalmente proporcional a demanda de las baterías ion-litio que se usan para los autos eléctricos (Andrés González & Jorge Cantallopts, 2021).

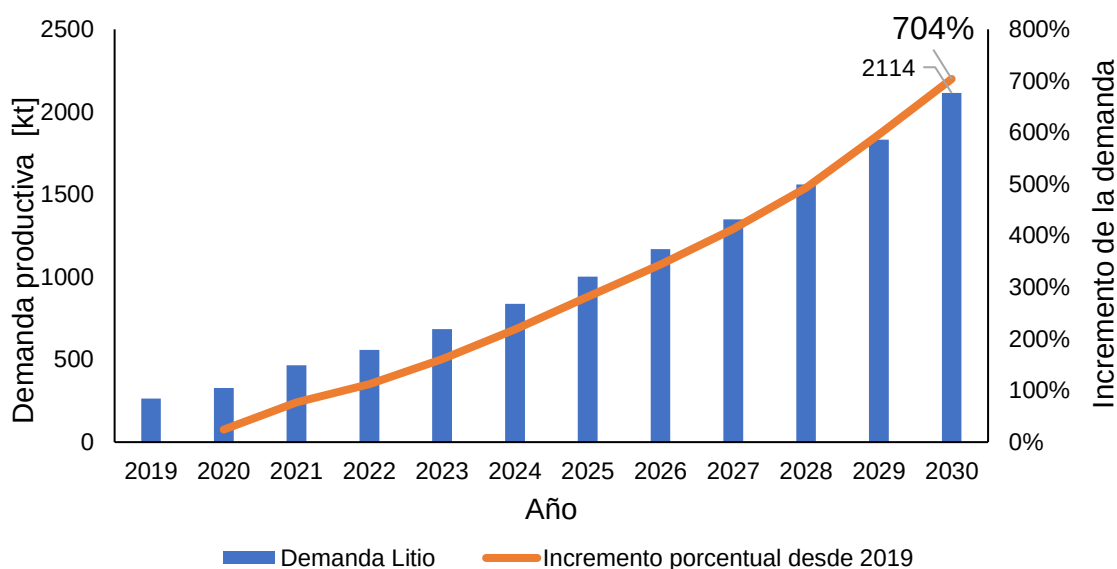


Gráfico 2: Proyección de demanda del litio 2030 (Salathiel González & Jorge Cantallopts, 2020)

1.2.2 Oferta

Como se ha mencionado anteriormente, las fuentes de extracción de litio pueden ser a partir desde yacimientos mineros a partir de pegmatita en forma de espodumeno, salmueras, arcillas y zeolitas. La mayor parte de las reservas de litio en el mundo se encuentran en el Triángulo del Litio (Argentina, Bolivia y Chile), donde Chile abarca la mayor parte de las reservas con un 36% del total (Brian W. Jaskula, 2013), teniendo una ventaja comparativa frente a sus competidores directos como Australia y China. Sin embargo, la participación en la producción mundial porcentual del mineral ha disminuido y mantenido hace 10 años como se puede ver en la Grafico 3.

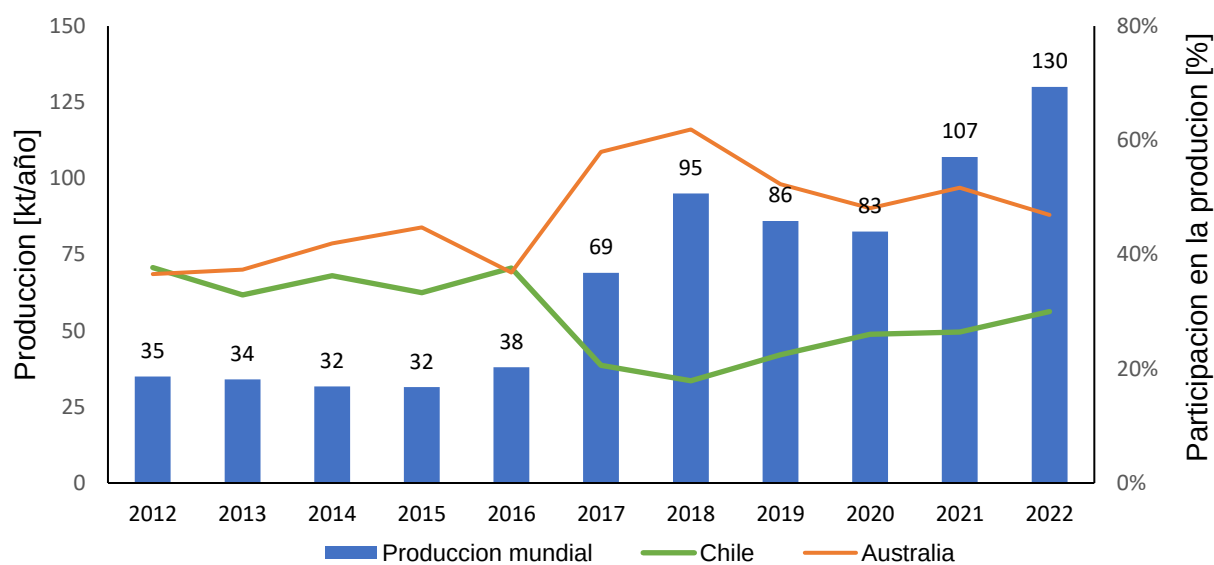


Gráfico 3: Cambio en la oferta porcentual mundial de Chile (Brian W. Jaskula, 2013)

Esto puede ser consecuencia del aumento de producción de Australia y el interés de nuevas regiones para posicionarse como productores de Litio, como Argentina. Los dos participantes de la extracción de salmueras en el país son la Sociedad Química y Minera (SQM) de Chile y Albermarle (Salathiel González & Jorge Cantallopts, 2021), quienes se enfrentan a un desafío para enfrentar la demanda creciente del litio, con el yacimiento más grande del mundo y con mayor concentración de litio, por lo que su objetivo recae en la innovación del proceso productivo.

1.2.3 Precio

La variación del precio de un producto se debe a la interacción entre la demanda y la oferta, en donde se observa una demanda exponencial del litio en el tiempo, mientras una producción que se mantiene constante, a esto se debe el precio máximo observado en noviembre del 2022 que llega a ser 5 veces el observado año anteriores (Gráfico 5), para luego observar una disminución constante del precio durante el 2023 que tiende a la estabilización.

Esta disminución en el precio del mineral no metálico se debe al aumento en la producción por parte de Australia y la desaceleración del crecimiento de la demanda de vehículos eléctricos por China. La caída del precio del litio puede llevar a una mayor producción de baterías y vehículos eléctricos, efecto que se verá posiblemente reflejado en el 2024. El futuro del precio del litio es incierto, ya que depende de factores del crecimiento de la industria electromotriz y la capacidad de los productores de litio para regular su producción. (Scott Patterson & Amrith Ramkumar, 2023)

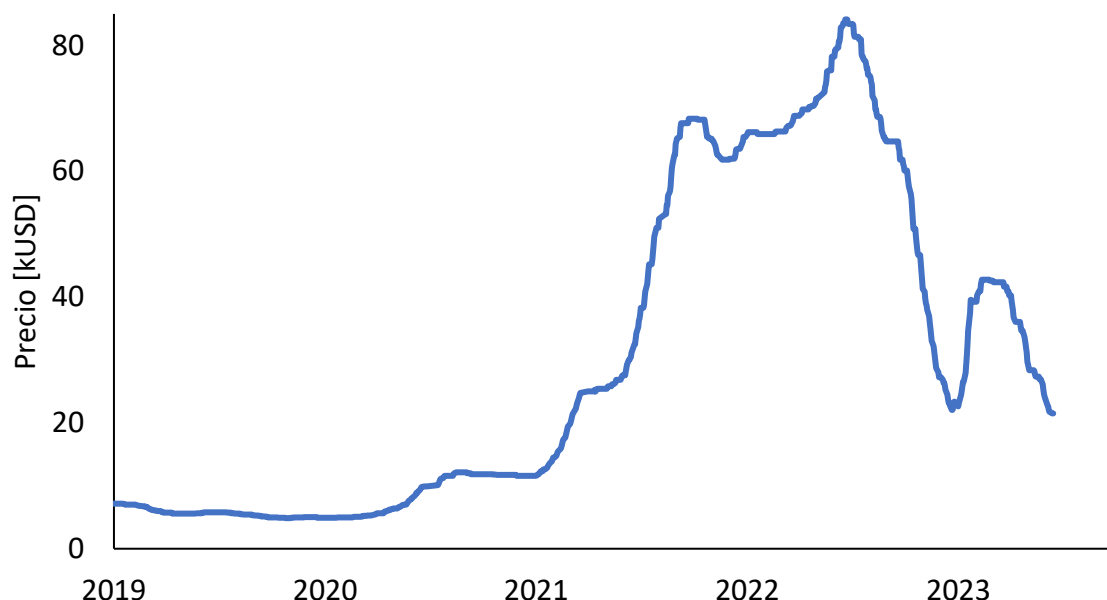


Gráfico 4: Precio del litio desde 2018 a la fecha (Trading Economics, 2023)

1.3 Procesos Productivo del litio a partir de salmueras

A continuación, se detallará el proceso productivo del litio a partir de salmueras realizado en Chile, enfocándose en la etapa más crítica que es la concentración, además se describen las nuevas tecnologías de extracción directa que se están desarrollando actualmente y compiten frente al proceso productivo actual.

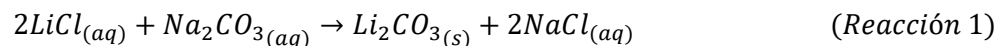
1.3.1 Proceso productivo convencional

Su origen es proveniente desde salares, donde el litio se encuentra disuelto en salmuera, la concentración del mineral de interés es variable al igual que las de otros elementos como magnesio, potasio, sodio, cloro, boro, hierro, etc, por lo que cada salmuera debe ser tratada de forma distinta (Tabla 2). La salmuera es extraída desde el salar a una profundidad que va desde 30 a 50 metros, bombeando 240 [L/s] (10,368 [m³/día]) de salmuera a piscinas de concentración por radiación solar, lo que favorece la concentración con una tasa de evaporación de 6 [L/m²] - 10 [L/m²] diario. En esta parte del proceso se inicia la precipitación secuencial de sales, la cual puede durar desde 10 a 24 meses, obteniendo una salmuera rica en litio con un concentrado cercano a 6%, lo cual equivale a 35 – 40% de LiCl. Luego, pasa a una etapa de purificación en dos etapas para precipitar el resto de los elementos como magnesio y calcio (Wilkomirsky, 2009).

Tabla 2: Composición de salmuera del Salar de Atacama (Igor Wilkomirsky, 2008)

Elemento	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺	Li ⁺	Ca ⁺²	Cl ⁻	SO4 ⁻²	NO3 ⁻	B	Br ⁻
% p/p	8	1.84	0.94	0.15	0.03	15.9	1.7	0	0.06	0.005

La salmuera purificada (LiCl) se trata finalmente con carbonato de sodio (Na_2CO_3) a una temperatura de $90\text{ }^\circ\text{C}$, precipitando carbonato de litio (Li_2CO_3) y cloruro de sodio disuelto (NaCl), según la Reacción 1;



Finalmente, el precipitado de Carbonato de litio es filtrado en caliente, para luego pasar a una etapa de secado en un secador rotativo indirecto obteniendo una producción anual de $39 \left[\frac{\text{kt Li}}{\text{año}} \right]$.

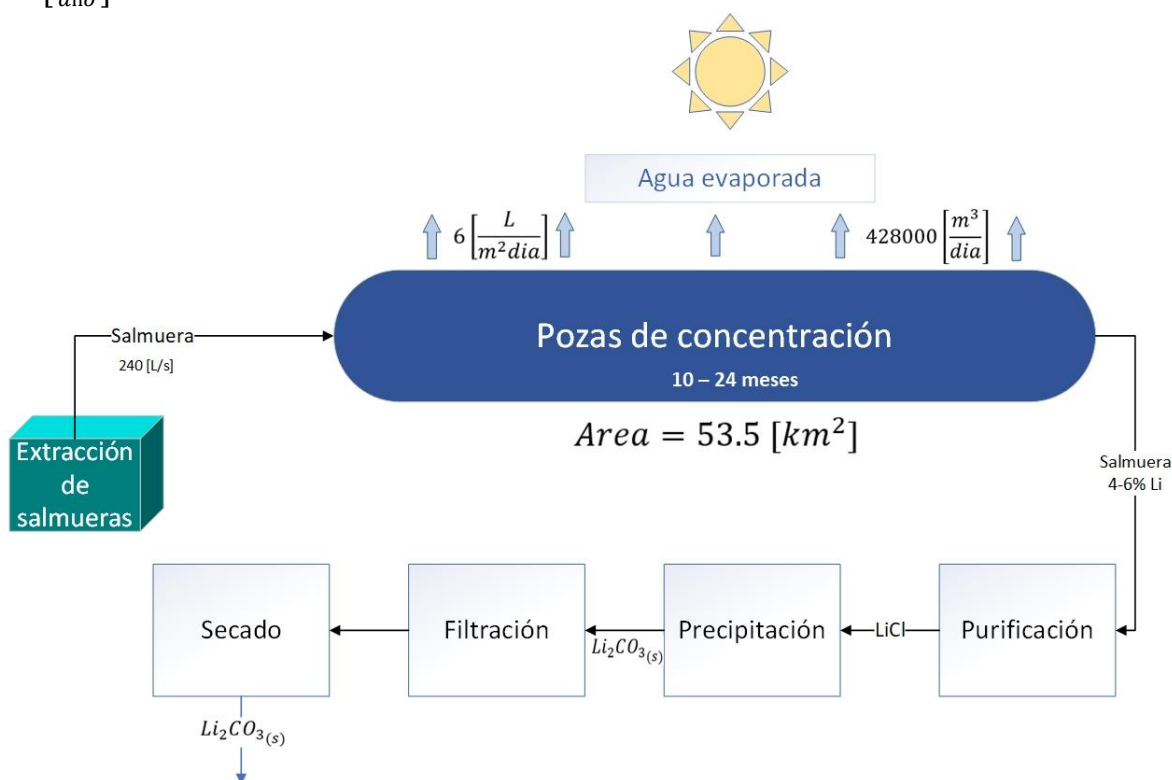


Figura 1: Proceso productivo de Carbonato de Litio (Wilkomirsky, 2009).

A partir de este proceso (Figura 1) se obtiene un carbonato de litio (Li_2CO_3), la cual es la materia prima para obtener hidróxido de litio o cloruro de litio para la obtención de litio metálico (Arentsen, 2020).

1.3.2 Nuevas tecnologías implementadas de extracción directa de litio

Debido al aumento progresivo de la demanda del litio, se han realizado distintas investigaciones para realizar una extracción más eficiente y rentable del mineral. A continuación, se muestran diversas técnicas como membranas selectivas, extracción por solvente, intercambio iónico y adsorción, como soluciones innovadoras y eficientes en el proceso de concentración de litio a partir de salmueras.

1.3.2.1 Extracción mediante membranas selectivas

La extracción de litio a partir de salmueras mediante membranas selectivas tiene un enfoque prometedor para la industria del litio, debido a sus ventajas de eficiencia energética, facilidad de operación y continuidad del proceso. Se han realizado distintas pruebas piloto a nivel de laboratorio, donde la nanofiltración ha sido el más relevante por su moderado costo operacional, bajo impacto ambiental y alta selectividad. Sin embargo, como otros métodos de extracción directa, la alta relación de Mg/Li, presenta un desafío en la recuperación selectiva del litio (Khalil et al., 2022), debido a su similitud en su radio iónico (Xu et al., 2021).

La nanofiltración es un proceso de separación mediante membranas impulsadas por presión. Estas membranas tienen la capacidad única para eliminar sales inorgánicas de soluciones acuosas, especialmente iones monovalentes en presencia de iones multivalentes. Los mecanismos de exclusión de utilizados en este tipo de filtración son la estérica, respecto al tamaño del ion frente a un tamaño de poro de 1 a 10 nanómetros y basado en la carga, ya que generalmente la superficie de las membranas está ligeramente cargadas, por lo que se genera un repulsión natural para los iones de carga opuesta (Butt et al., 2022).

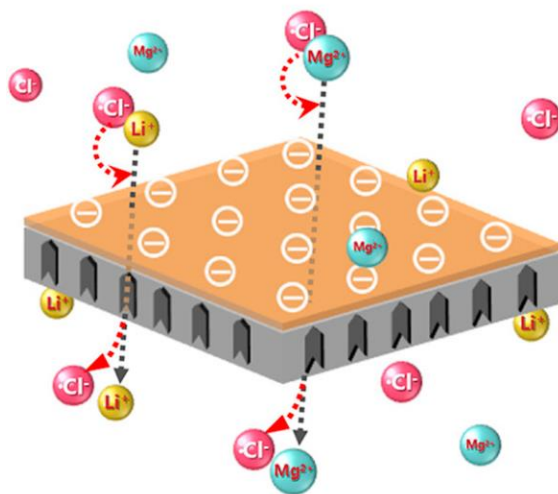


Figura 2: Extracción litio por nanofiltración (Lu et al., 2021)

Frente altas concentraciones de magnesio la selectividad de la extracción de litio por parte de la membrana se ve afectada y en consecuencia su calidad, logrando extracciones de litio de 40 – 90% en el mejor de los casos, usando altas presiones (Somrani et al., 2013), por lo que es un proceso sin robustez de resultados para una salmuera que está en constante cambio, además de la energía necesaria para la operación de grandes volúmenes de salmuera. El uso que se le ha encontrado es usar este proceso para pretratamiento y producción de salmueras más limpias (Stringfellow & Dobson, 2021).

1.3.2.2 Extracción por adsorción

El proceso de adsorción consiste en proceso de extracción selectivo mediante la interacción superficial de iones presentes en la fase acuosa y la superficie del adsorbente como se observa en la Figura 3 (Chi Tien, 2019). Este método ha cobrado interés debido a su alta selectividad frente a salmueras con una alta presencia de magnesio frente a la del litio y salmueras de agua de mar con complejas composiciones de iones (Butt et al., 2022). Múltiples adsorbente se han puesto a prueba para extraer litio directamente de las salmueras, donde el manganeso y titanio han sido ampliamente estudiados como adsorbente (Khalil et al., 2022).

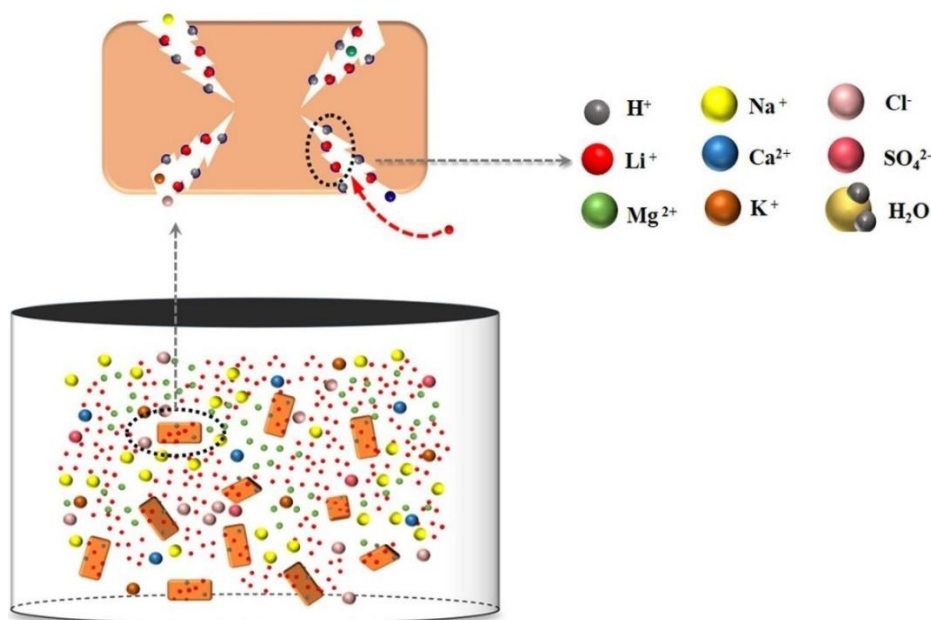


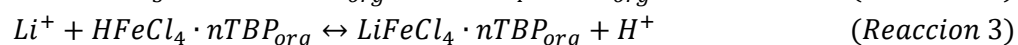
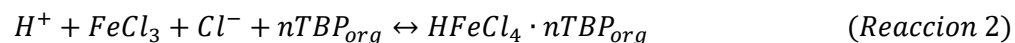
Figura 3: Extracción directa de litio mediante adsorción (Zhu et al., 2021)

Se ha utilizado óxido de manganeso como adsorbente, en donde se han obtenido recuperaciones de hasta el 80% en 3 días, sin embargo, existe una masa de litio que queda adherido al adsorbente en el proceso de desorción, que se incrementa a medida que la presencia de magnesio aumenta, llegando a recuperaciones efectivas del 90% del litio capturado (Chitrakar et al., 2001). Es relevante dimensionar la cantidad de torres y de adsorbente que se necesitarán para procesar los grandes flujos de salmuera para que el proceso sea rentable, por lo que la viabilidad del proceso se ve afectada.

1.3.2.3 Extracción por solventes

La extracción por solvente es un método de purificación que consiste en la separación de un ion metálico específico utilizando un solvente orgánico con la capacidad de disolver grandes cantidades de cloruro de litio con una buena selectividad frente a otras sales disueltas. Múltiples investigaciones han puesto a prueba distintos orgánicos para la extracción de Litio de salmueras, donde el tributil fosfato (Khalil et al., 2022).

Este extractante organofosforado, es eficiente para salmueras con una alta presencia de magnesio, usando kerosene como solvente y cloruro de hierro (FeCl_3) como agente coextractante. El mecanismo de extracción se muestra a continuación (Zhou et al., 2012):



Los resultados de la investigación indicaron que se obtuvieron extracciones cercanas al 80% del metal ligero, al igual que para el Fe, frente a distintas sales como cloruro de magnesio, cloruro de calcio y cloruro de amonio (Khalil et al., 2022).

Sin embargo, es un proceso no viable, frente a una salmuera con composiciones de sales que están en constante cambio, por lo que los resultados de extracción se ven afectados. Además de la cantidad de orgánico para el procesamiento de grandes volúmenes de salmueras para que el proceso sea valorable económicamente.

1.3.2.4 Extracción por Intercambio iónico

La técnica de extracción de litio ha surgido como un método con gran potencial para la extracción de litio. El proceso corresponde al reemplazo de iones de litio en la solución acuosa, con iones de otro elemento, donde la variable más relevante es el pH de la solución. Cuando el pH es bajo, el material absorbe iones de hidrógeno y cuando el pH es alto, el material absorbe el litio y libera iones de hidrógeno (Figura 4) (Snydacker et al., 2018).

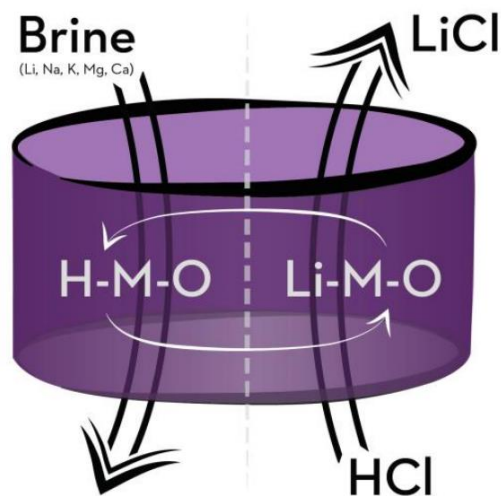


Figura 4: Extracción de litio por intercambio iónico (Snydacker et al., 2018)

Existe una variedad amplia de compuestos que se han usado para aumentar la eficiencia del proceso, la mayoría de estos son $\text{Li} - \text{M} - \text{O}$ (Figura 4), donde M corresponde a magnesio o titanio (Snydacker et al., 2018). A continuación, se observa (Figura 5) un circuito de un prototipo de extracción de litio mediante agua de mar por este método.

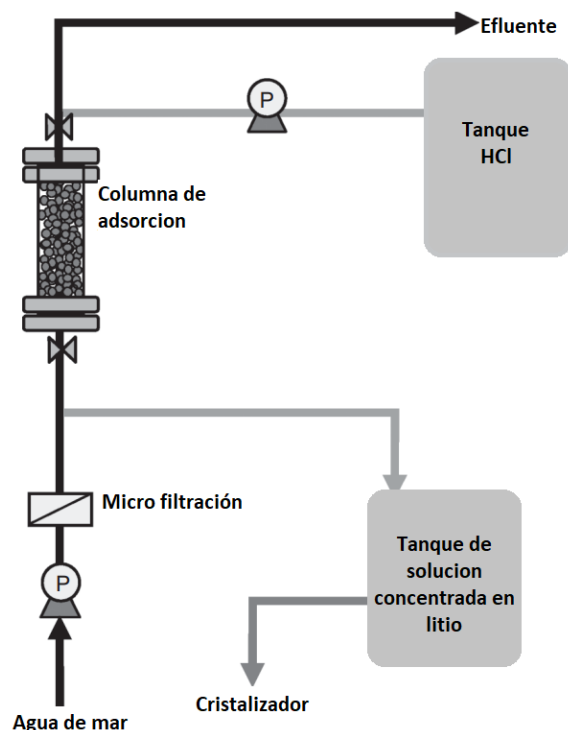


Figura 5: Sistema de propuesta de extracción de litio mediante intercambio iónico (Nishihama et al., 2011)

La columna de adsorción de dióxido de magnesio es pretratada con ácido clorhídrico, luego se le inyecta agua de mar durante 150 días, para finalmente lavar este adsorbente mediante agua dulce, obteniendo una solución rica en sales (Nishihama et al., 2011). Este conlleva disminuciones en los tiempos de operación, pero implica un mayor costo de inversión y operación debido a la necesidad de post tratamientos de la solución rica en litio para su extracción.

1.4 Crisis hídrica y la industria de litio

La crisis hídrica es un fenómeno global, que representa unos de los mayores problemas para diversas industrias, especialmente para cuales utilizan este recurso para sus procesos productivo en grandes cantidades, donde la industria del litio no está fuera de este desafío, debido a la ubicación en que se desarrolla esta actividad productiva, donde el agua es escasa, perdiendo el seguimiento del ciclo de este recurso en su evaporación al ambiente. Se examinará los desafíos a los que se enfrenta Chile frente a esta problemática y la oportunidad que se presenta para la innovación para una industria con una alta huella hídrica.

1.4.1 Evaluación del impacto hídrico de la industria del Litio

Actualmente, el proceso productivo de Litio en Chile es a partir de salmueras extraídas del Salar de Atacama en la región de Antofagasta, las cuales son concentradas en piscinas de concentración las cuales utilizan gran área de alrededor de 53.5 [km²] (Figura 6), con una tasa de evaporación de 6 -10 [L/m²] diario.

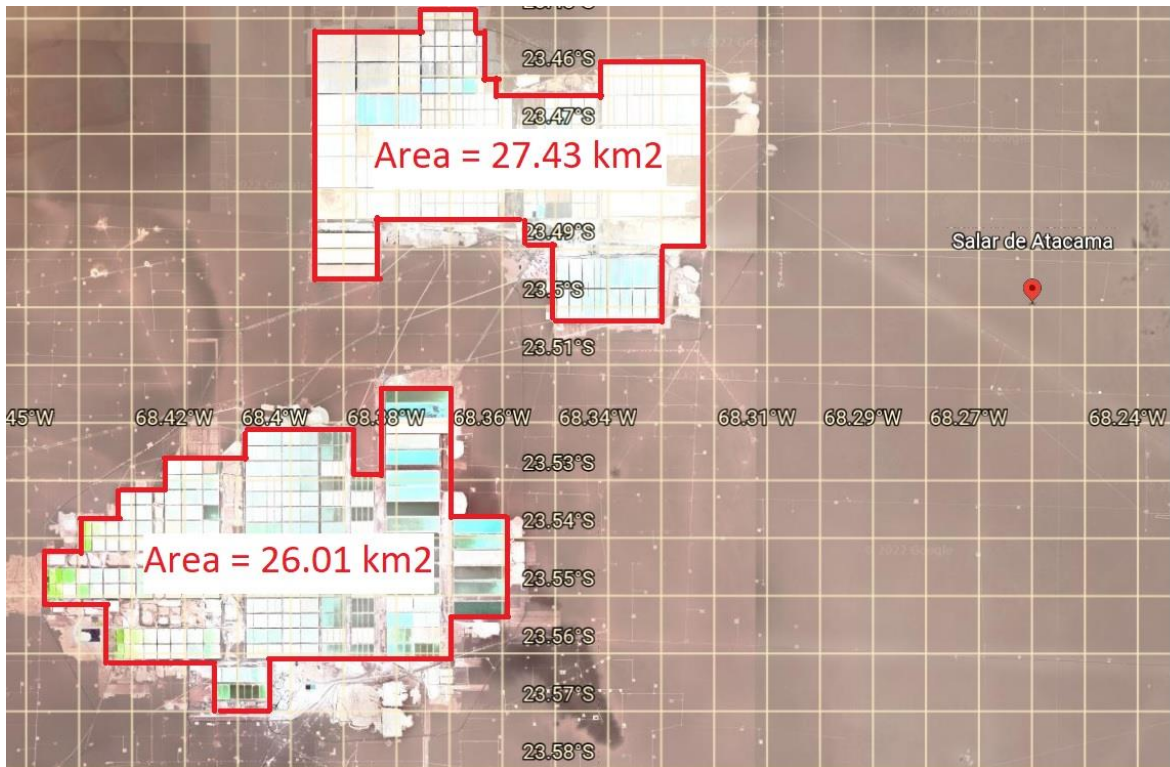


Figura 6: Área de pozas de evaporación ubicadas en el Salar de Atacama – Chile (Figura extraída de Google Earth – junio 2022)

Frente a estos datos se puede calcular la cantidad de agua evaporada diaria por las piscinas de evaporación, según:

*Volumen de agua evaporada*_{diaria} = tasa de evaporacion * area de las pozas

$$V_{\text{agua.evaporada}} = 8 \left[\frac{L}{m^2 \text{ dia}} \right] * 53.5 [km^2]$$

$$V_{\text{agua.evaporada}} = 428000 \left[\frac{m^3}{dia} \right] = 156.22 \left[\frac{Mm^3}{año} \right]$$

Ahora si consideramos la producción anual del litio del 2022, que fue de $39 \left[\frac{kt \text{ Li}}{año} \right]$, el impacto hídrico de la industria del litio es:

$$\text{Costo hídrico} = \frac{156.22 \left[\frac{Mm^3}{año} \right]}{39 \left[\frac{kt \text{ Li}}{año} \right]} = 4.0056 \left[\frac{Mm^3}{kt \text{ Li}} \right] \approx 4 \left[\frac{\text{millones } L}{ton \text{ Li}} \right]$$

Como se puede observar, existe una cantidad de volumen de agua que se pierde en el proceso de productivo por lo que se demuestra que el método de producción no es amigable con el ambiente, no recuperando un recurso significativo en el desierto más árido del mundo.

1.5 Diseño de la tecnología propuesta

Como se ha mencionado anteriormente Chile posee la mayor reserva de litio en el mundo, por lo que debiese ser protagonista en su producción, para utilizar la materia prima en la generación de baterías ion-litio frente a las proyecciones de demanda de autos para los próximos años.

Es relevante mencionar que el proceso de producción de carbonato litio en Chile se basa principalmente en concentración y precipitación del mineral objetivo, donde el proceso de evaporación en las pozas tiene una larga duración. Considerando que esta agua se evapora y se va al ambiente en la región más árida del mundo, por lo que las empresas productoras se han visto en la necesidad de crear políticas de sostenibilidad, declarando compromisos de huella hídrica.

Frente a estas problemáticas se crea la necesidad de innovar en el proceso de concentración de salmueras, aumentando sus tasas de evaporación diarias, recuperando el agua de salmueras, lo que conlleva un aumento en la producción de litio. Por ello se plantea la implementación de un estanque de evaporación con microburbujas secas con recuperación de agua de salmueras y reintegración energética.

1.5.1 Prototipo

La tecnología patentada (201903622, INAPI), comprende a un sistema de concentración de salmuera, mediante la inyección de microburbujas secas, con recuperación del agua y reintegración energética (Guerra & Acuña, 2021), la cual será complementada y mejorada incorporando el diseño de la etapa más crítica del proceso, que comprende el secado del aire mediante una torre de adsorción o etapa disecante como se muestra en la Figura 7.

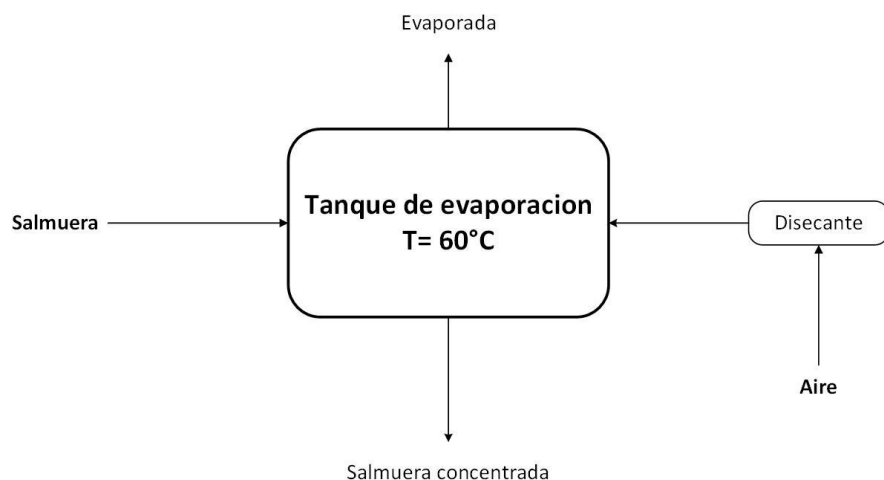


Figura 7: Diagrama de flujo del método del prototipo patentado (Guerra, Acuña, 2021)

El prototipo comprende un sistema de evaporación de agua de salmueras de piscinas de concentración, donde el método suministra aire seco a un estanque de evaporación desde una matriz de aire; se seca el aire hasta una humedad relativa cercana a 0% mediante una

torre de adsorción, ajustando su temperatura mediante intercambiadores de calor, para luego ser inyectado al estanque de concentración mediante un inyector o medio poroso, logrando que las burbujas tengan una distribución de diámetros requeridos por el método. La salmuera es sometida a múltiples reintegraciones energéticas que buscan su aumento de temperatura para potenciar su evaporación dentro del estanque

Para realizar la explicación del funcionamiento y descripción de los equipos que forman parte del sistema del diagrama de flujo anteriormente expuesto, se muestra la Figura 8 y Tabla 3.

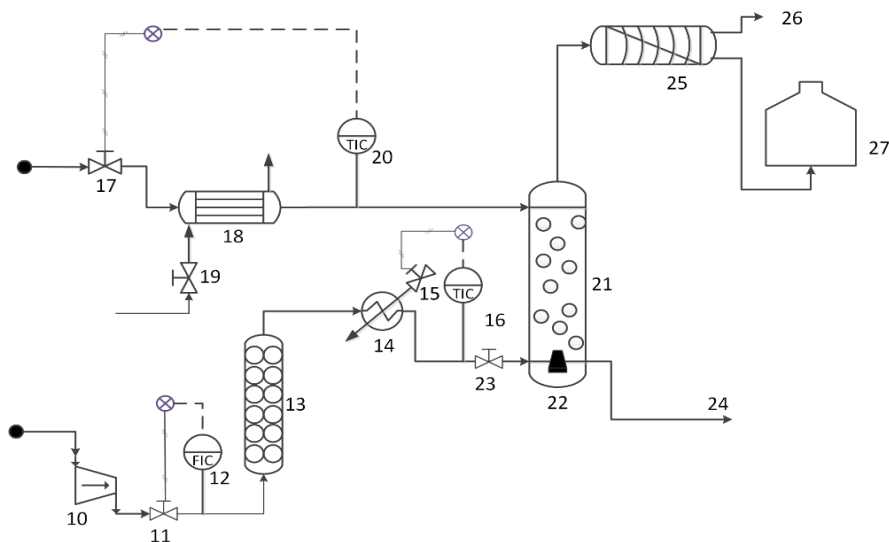


Figura 8: Diagrama de indicadores y equipos del sistema de concentración de salmueras (Guerra, Acuña, 2021)

Tabla 3: Descripción de los equipos Figura 8

N°	Equipo	N°	Equipo
10	Compresor	19	Válvula de servicio de agua a [18]
11	Válvula de Globo	20	Indicador Controlador de Temperatura en cascada con [17]
12	Indicador Controlador de flujo en cascada con [11]	21	Estanque de evaporación
13	Columna de Adsorción	22	Difusor de material poroso
14	Intercambiador de calor	23	Válvula de alimentación de aire
15	Válvula de servicio de aire seco	24	Salmuera concentrada
16	Indicador controlador de temperatura en cascada con [15]	25	Sistema refrigerativo y deshumidificador del aire
17	Válvula de alimentación de Salmuera	26	Aire a la atmosfera
18	Intercambiador de tubo y coraza	27	Tanque de almacenamiento de agua

El secado del aire se realiza mediante una torre de adsorción [13] donde el aire seco cumple la función de favorecer la transferencia de masa y calor del sistema liquido-gas dentro del estanque [21], la cual cuenta con unas lanzas con punta porosa que ayudan a la generación de microburbujas y son fácil de retirar en caso de mantención del equipo.

El fenómeno de transferencia de materia que ocurre dentro del estanque es de tipo difusivo, donde su fuerza motriz corresponde a la diferencia de humedades o de carga de agua entre el seno de la burbuja seca y las moléculas de agua, las cuales se evaporan en la interfaz agua-aire debido al diferencial de energía cinética de ambos estados.

La tasa de evaporación del prototipo se representa por la masa de agua evaporada en la masa de aire seco inyectada al sistema, sin embargo, como método comparativo frente al rendimiento del método convencional de concentración de salmueras en piscinas de evaporación, se expresará como litros de agua evaporada por metro cuadrado día [$L/m^2/día$] (Guerra & Acuña, 2021).

1.5.2 Sistema de secado (torre de adsorción)

El aire es suministrado al sistema desde la matriz, el cual pasa por un soplador de aire [10], alimentando con el gas necesario para el proceso. A continuación, el aire es secado hasta la humedad relativa cercana a 0%, mediante el uso de desecante (Silica gel), el cual posee características para la adsorción de partículas de agua. El sistema consistirá en torres en serie, con el objetivo de que el aire este completamente seco, más un arreglo en paralelo para generar la regeneración del adsorbente mediante su desorción, asegurando la continuidad operacional del sistema (Guerra & Acuña, 2021).

1.5.2.1 Caracterización del adsorbente

La adsorción es un fenómeno de transferencia de materia entre fases, consiste en la adhesión de partículas, iones, átomos o moléculas en la superficie del material llamado adsorbente, creando una película o interfase, la cual es una de las 3 fases que definiremos, fase gaseosa o adsorbato, donde se encuentra el material que se requiere retirar y la fase solida o adsorbente donde las partículas se adhieren, como se describe en la Figura 9.

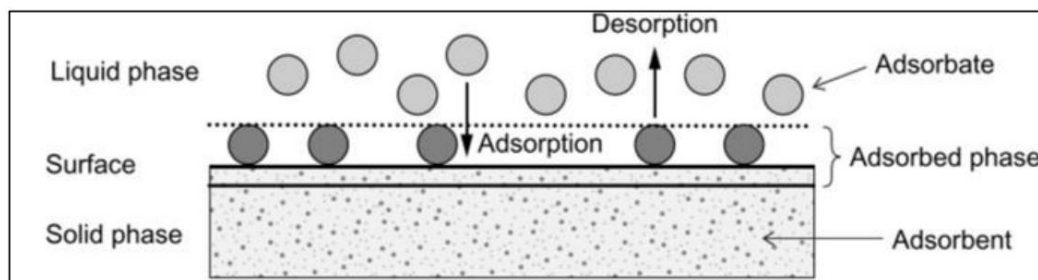


Figura 9: Proceso de Adsorción en la superficie de la partícula adsorbente (Chi Tien, 2019)

Existen múltiples variables que influyen en la eficiencia de este proceso, tales como, la interacción entre la superficie adsorbente y el adsorbato, el tamaño de partícula del adsorbente, su superficie específica, temperatura del sistema, pH y tiempo de contacto (Chi Tien, 2019).

En las aplicaciones industriales de la adsorción, es de suma importancia la selección del adsorbente correcto para el adsorbato que se requiere retirar de la solución, por lo que la afinidad que existe entre estos dos agentes, curva de la isoterma, capacidad de adsorción y transferencia difusiva son parámetros determinantes para el diseño (Sayilgan et al., 2016).

- Tamaño de partícula

En el proceso de adsorción, el tamaño de partícula del adsorbente es un parámetro crucial que influye significativamente en la transferencia de masa y, por lo tanto, en la eficacia del proceso de adsorción. Esto se debe a que el tamaño de partícula del adsorbente afecta tanto en las resistencias de transferencia de masa inter-partícula como en la intra-partícula. La resistencia de transferencia de masa inter-partícula está relacionada con la caída de presión dentro del sistema, mientras que la transferencia de masa intra-partícula está controlada por la porosidad y el diámetro de las partículas, lo que se traduce en área superficial disponible para llevar a cabo el proceso de transferencia de masa (Hoda Talebian et al., 2012).

Por lo tanto, es importante considerar cuidadosamente el tamaño de partícula del adsorbente en la selección y diseño del proceso de adsorción, ya que puede tener un impacto significativo en la eficiencia del proceso. (Niazmand et al., 2013).

- Isoterma de adsorción

En cualquier proceso de transferencia de materia es necesario conocer su dinámica y equilibrio, donde se busca conocer cuál es la capacidad de adsorción del adsorbente frente al adsorbato. La carga en el equilibrio (q_{eq}) el cual se define en la concentración de equilibrio del soluto (C_{eq}) y la temperatura del sistema, lo cual nos definirá la dinámica del proceso.

$$q_{eq} = f(C_{eq}, T) \text{ (Ec. 1)}$$

Sin embargo, para desarrollar el equilibrio se asume temperatura constante, de esta forma podremos construir isotermas de adsorción, las cuales son representaciones gráficas de la cantidad de soluto adsorbido en la superficie de un adsorbente en equilibrio con una solución líquida a diferentes concentraciones. Estas isotermas son herramientas fundamentales para la caracterización y selección de adsorbentes en procesos de adsorción. En general, las isotermas de adsorción se clasifican en distintos tipos, donde los modelos más populares son el método de Langmuir y Freundlich (Tabla 4), de esta forma se analizará que modelo se asimila más al comportamiento del adsorbente, para predecir su capacidad de adsorción (Chi Tien, 2019).

Tabla 4: Isotermas de adsorción estudiadas

Modelo de Langmuir	Modelo de Freundlich
$q = q_{max} * \frac{K_L * C_{eq}}{1 + K_L * C_{eq}} \quad (Ec. 2)$	$q = k_f * C_{eq}^n \quad (Ec. 3)$
- q_{max}: capacidad máxima de adsorción - K_L: Afinidad entre el adsorbente y el adsorbato	- k_f y n describen la capacidad y afinidad de la adsorción

El proceso de obtención de la isoterma de adsorción involucra la recopilación de datos experimentales que permitan conocer la cantidad de adsorbato adsorbido en la superficie de la silica gel en función de la concentración en equilibrio del adsorbato, bajo condiciones de temperatura y presión constantes.

Para el caso de la adsorción en fase gaseosa, se regulariza la concentración del adsorbato en el gas, y se hace pasar a través de un equipo de adsorción. La cantidad adsorbida se mide a través de la diferencia entre el peso del adsorbente sin adsorbato y luego es sometido al flujo de gas con el contaminante.

Capítulo 2: Diseño e implementación del equipo piloto.

Descripción de materia prima

En esta sección se estudiará los componentes fundamentales para llevar a cabo el proceso de concentración de salmueras mediante la inyección de burbujas secas: la sílice gel como material adsorbente y la salmuera como el fluido concentrado. Profundizaremos en las características físicas y propiedades de la sílice gel para la deshumidificación del aire. Además, examinaremos la composición de la salmuera.

- **Silica gel**

El diseño del sistema de concentración de salmueras mediante la inyección de burbujas secas comienza con la caracterización del adsorbente, en este caso, se selecciona sílice gel.



Figura 10: Adsorbente a validar - Silica Gel

Se lleva a cabo la tamización de la silica gel comercial (Figura 10), seleccionada como adsorbente para el prototipo, mediante una torre de tamices como se observa en la Figura 11 (N° 4, 8, 10, 16, 30, 50), donde el método realizado viene estandarizado de acuerdo a la norma ASTM C136-01 (C09 Committee, 2017)



Figura 11: Torre de tamices (N° 4, 8, 10, 16, 30, 50)

Para normalizar la distribución del tamaño de partícula del adsorbente, se utiliza el modelo de Rosin Rammbler.

$$\%F = \left(1 - \exp\left(\frac{d}{d'}\right)^n \right) * 100 \quad (Ec. 4)$$

Donde $\%F$ es la masa pasante acumulada, d se refiere al tamaño de partícula, d' es el tamaño medio de la partícula y n es una medida de dispersión de tamaño de partícula; l y n son parámetros característicos ajustable a distribución.

- Determinación de la densidad del adsorbente

Para obtener la densidad aparente y real del adsorbente se realizó el proceso determinado según la norma ASTM D854-14 (D18 Committee, 2023).

De igual forma podemos obtener la porosidad del lecho, la cual viene determinada por la siguiente Ecuación 5:

$$Porosidad = \frac{V_{agua}}{V_{silica\ gel}} \quad (Ec. 5)$$

- Determinación de la isoterma de adsorción

A continuación, se señala el procedimiento utilizado para obtención de los datos experimentales de adsorción de la sílica gel frente a la humedad del medio.

1. Se toma la masa total de sílica gel y se las lleva a la mufla a 120°C durante 4 horas en bandejas de metal,
2. Se toma una muestra de 100 [g] de adsorbente seco y se lleva a la incubadora de humedad a una temperatura constante de 22 °C a una humedad relativa determinada durante 24 [h],
3. Luego se vuelve a pesar la muestra de sílica gel en la balanza, para obtener la concentración en equilibrio del adsorbato en el adsorbente, mediante la diferencia de masa entre el adsorbente seco y húmedo.
4. Luego se repite el proceso desde el punto uno del mismo procedimiento a diferentes humedades relativas (20 – 90%)
5. Con estos datos recopilados se realiza la isoterma de adsorción del adsorbente, obteniendo los parámetros del modelo que representa a la isoterma de adsorción.

- **Caracterización de la salmuera**

Al momento de probar el prototipo propuesto, es necesario caracterizar la salmuera extraída de una de las pozas de evaporación del salar de Atacama empleada en el experimento, es por esto que se utiliza un equipo multiparámetro Hanna HI5522

Modelación y evaluación de las variables operacionales en el sistema disecante

A partir de las características físico químicas del adsorbente caracterizado, se modela el proceso de adsorción mediante Aspen Adsorption V9, para la determinación de la curva de quiebre y a partir de eso determinar el tiempo máximo de operación del sistema.

Para la simulación se consideró un diagrama simple de adsorción (Figura 12), con un flujo de aire de servicio con las composiciones especificadas en la Tabla 6 que ingresa a la etapa de adsorción y un flujo de salida con contenido de agua dinámico como se revisará en la sección de resultados y discusión.

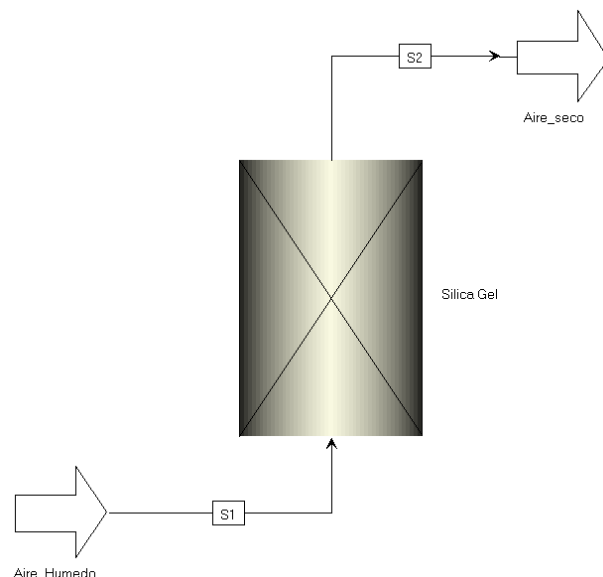


Figura 12: Sistema de adsorción para secado de aire simulado en Aspen Adsorption V9

Las condiciones del aire de entrada se especifican en la Tabla 5.

Tabla 5: Condiciones del aire de servicio simulado

Condiciones del aire de servicio	
Temperatura	15 °C
Altura	0 m
Humedad relativa	80 %
Humedad absoluta	8.5 gH ₂ O/kg H ₂ O aire seco
Composición del aire de servicio	
CO ₂	0.035 %
H ₂ O	1.354 %
N ₂	78.08 %
O ₂	20.95 %

Al momento de simular en Aspen Adsorption V9, es importante especificar las condiciones del empaque para realizar un modelado que sea preciso, junto a las suposiciones correctas del caso. Específicamente es necesario definir los modelos de transferencia de masa en la fase sólida y líquida, ya que esto puede afectar considerablemente en el rendimiento de la columna y la eficiencia del proceso.

Supuestos

1. Se asume un balance de materia solo de tipo convectivo, es decir, que el transporte de materia se rige principalmente por el movimiento del fluido de entrada cargado con adsorbato, lo cual es correcto para este caso donde tenemos una silica gel que se encuentra en estado estacionario, frente a una masa de aire húmedo que fluye a través del lecho, que no tiene problemas en difundirse en el adsorbente.

2. Además, un balance de momentum regido por la ecuación de Ergun lo cual es válido para flujos laminares y turbulentos dentro del lecho. Esta ecuación es útil para describir la distribución de la velocidad superficial y la pérdida de presión dentro del empaque (Chi Tien, 2019), consideraciones que si bien no afectan a la hora de realizar el proceso de adsorción, es determinante sobre variables operacionales en procesos posteriores y evaluaciones energéticas.
3. En el proceso de adsorción se entre el aire y la silica gel no existen reacciones químicas significativas. El proceso se lleva a cabo mediante fuerzas intermoleculares, como la fuerza de Van der Waals, que captura la molécula de agua en los sitios activos de la silica gel, sin generación de nuevas sustancias químicas o productos secundarios (Ruthven, 1984).
4. En relación con las dimensiones del reactor, se supone una altura de 150 [cm] y diámetro externo de 5 [cm].

Considerando los supuestos anteriores, fue posible realizar la simulación del proceso de adsorción de una columna empacada de silica gel, con un flujo de entrada de aire húmedo.

- **Sensibilización**

Como objetivo de este capítulo se abordará la influencia de las variables temperaturas y presión de inyección de aire en el proceso de adsorción de una columna empacada de 1.5 [m] de altura y 4.4 [cm] de diámetro interior a 3 flujos de aire distintos con los que se espera operar (50, 150, 250 LPM), en donde se planea implementar el sistema para obtener la dinámica de la concentración de agua a la salida de la columna, lo cual se puede observar mediante la curva de quiebre del sistema.

- Temperatura

Se realiza una sensibilización de temperatura debido a efecto significativo en el proceso de adsorción física, al ser un proceso exotérmico, no le favorece el aumento de temperatura, disminuyendo las fuerzas de adsorción, entre el adsorbato y el adsorbente, afectando los sitios activos de la silica gel, sin embargo, no es igual para todos los adsorbentes (Gaikwad & Misal, 2010).

Para esto se sensibilizan los flujos a trabajar a la temperatura ambiente de la región de Valparaíso (20°C), y la máxima temperaturas que se pueden observar en el desierto de Atacama (40°C) a una presión de inyección de 2 bar.

- Presión

Es relevante considerar la variación de presión dentro del sistema de adsorción, ya que tiene un impacto significativo en la entalpia de la termodinámica del proceso, debido a su

influencia en la energía libre de Gibbs (G), mediante la entalpía del sistema (H) así como otros parámetros termodinámicos como la temperatura (T) y entropía (S). La entalpía a su vez es dependiente de la presión (P), junto con la energía interna (U) y volumen del sistema (V) (Myers & Monson, 2002), que se ve reflejado en el equilibrio termodinámico y las interacciones del adsorbente y el adsorbato (Chi Tien, 2019). Por lo tanto, un aumento de la presión de operación beneficia la difusión del adsorbente en la fase sólida del adsorbente.

$$G = H - TS \quad (Ec. 6)$$

$$H = U + PV \quad (Ec. 7)$$

Se sensibiliza esta variable para 2 – 4 bar, debido a que son presiones bajo los 7 bar de servicio que se pueden obtener de la línea de aire.

Diseño propuesto

Se presenta la propuesta de implantación de una torre de secado de aire de servicio ($H.R = 0.1$) por adsorción utilizando silica gel como adsorbente para la validación de la tecnología. El objetivo principal es la generación de burbujas secas de aire para su inyección en un estanque que contiene salmuera a diferentes temperaturas de solución, con el fin de lograr su concentración asistida, alcanzando el TRL 5 de la tecnología. En la Figura 13, se muestra el diagrama de flujo del prototipo propuesto a escala de laboratorio con las 2 etapas del sistema e instrumentación de las líneas de flujo, las cuales son descritas en la Tabla 6.

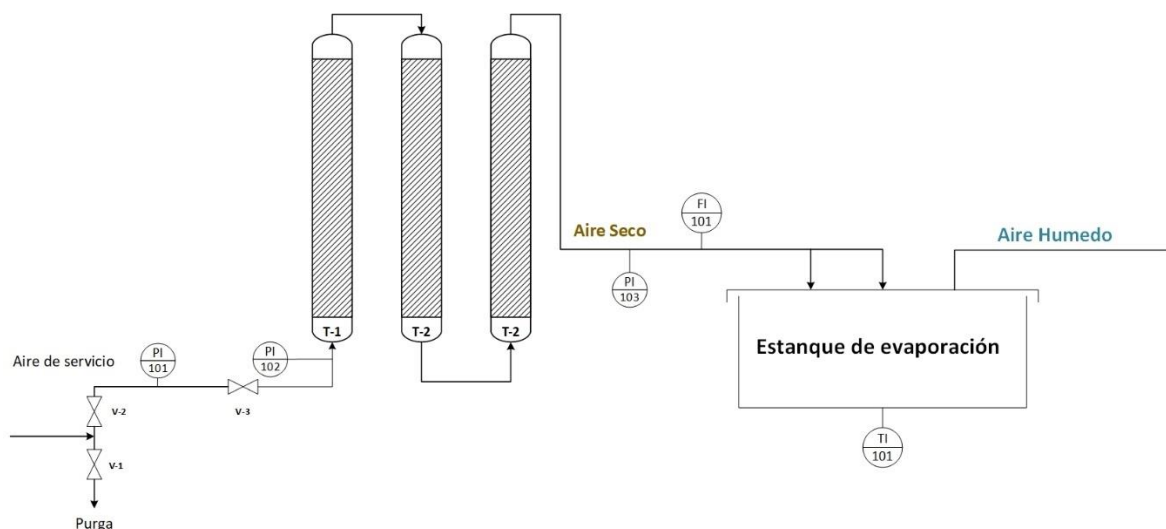


Figura 13: Diagrama de flujo del prototipo de evaporación asistida mediante burbujas secas

Tabla 6: Descripción de la notación del diagrama de flujo del prototipo

Notación	Descripción
T-1, 2, 3	Torres disecantes empacadas
Estanque de evaporación	Etapa de concentración asistida de salmueras
V-1, 2, 3	Válvulas de flujo
PI – 101, 102, 103	Sensores de presión
F1-101	Flujómetro

A continuación, se abordarán los parámetros claves considerados para el diseño considerando los requisitos técnicos de las variables que se desean estudiar para lograr la validación del prototipo.

- **Sistema de las torres disecantes**

Para el diseño de esta etapa se consideraron 3 torres de adsorción de acrílico, empacadas con silica gel. Estas torres serán utilizadas para eliminar la humedad del aire hasta una humedad relativa cercana al 0.1%. Las dimensiones fueron previamente validadas en el capítulo anterior. Para efectos de construcción, se dividió la torre simulada de en el capítulo anterior de 1.5 [m] en 3 columnas de acrílico de 0.5 [m] con 2 pulgadas de diámetro, con un L:D de 10.

En el diseño y operación de equipos, la seguridad es un tema primordial, para asegurar que las instalaciones cumplan con estándares de operación, protegiendo así al operador y la continuidad operacional del proceso. Por esto, se implementó con una serie de válvulas y sensores de presión, que juegan un rol importante para evitar situaciones peligrosas en relación con la presión del servicio de aire, debido a que se están usando tuberías de PVC con una presión límite de operación de 10 [bar]. En la Tabla 7, se detallan las distintas válvulas y sensores de presión implementados.

Tabla 7: Detalle de la instrumentación de seguridad del sistema disecante

Notación	Tipo	Función
V-1	Válvula de Globo	Eliminar el condensado en la línea
V-2	Válvula de Globo	Regular la presión de aire de servicio
V-3	Válvula de Aguja	Regular el flujo de aire de ingreso a las comunas
PI-101	Manómetro	Indicar presión de servicio
PI-102	Manómetro	Indicar la presión de entrada al sistema

- **Estanque de evaporación**

En esta sección se describe el diseño y construcción del estanque de evaporación asistida de salmueras con sellado hermético, control de temperatura y con lanzas con punta porosa para inyección del aire seco al sistema. El objetivo principal es controlar las variables operacionales para lograr la concentración de la salmuera como lo es la temperatura de la solución y velocidad superficial del aire.

El dimensionamiento del estanque se realizó en relación con el baño termostático, en donde se diseñó un techo de acrílico con el objetivo de colocar los inyectores de aire y tener una evaporación más controlada de la solución, por lo que se utilizó el programa de diseño Fusion 360 para realizar el levantamiento en 3 dimensiones del diseño (Figura 14).

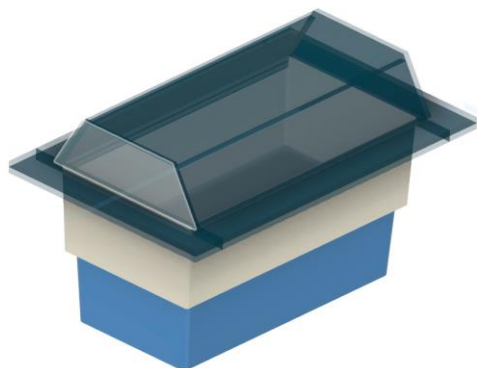


Figura 14: Estanque de evaporación de salmuera

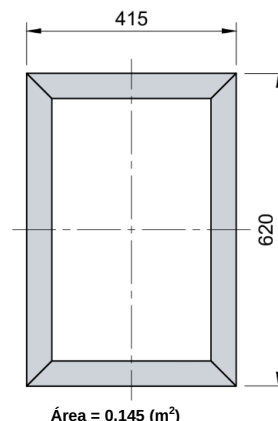


Figura 15: Dimensiones cuadro de acrílico

El área de evaporación del sistema está limitada por el área rectangular superior del baño termostático de 0.145 [m²], como se observa en la Figura 15 (Anexo 1.1).

Capítulo 3: Diseño experimental

En este capítulo, se aborda el diseño e implementación de la columna de adsorción validada en el capítulo anterior y el estanque de evaporación o concentración de salmueras mediante la inyección de burbujas secas.

Metodología de trabajo

Para comenzar la operación del sistema; equipo de secado de aire, estanque de evaporación y monitoreo de las variables temperatura de solución y flujo de aire se debe realizar una secuencia de actividades para llevar a cabo la operación del proceso, a continuación, se detalla el procedimiento:

1. Secar la silica gel mediante un horno calefactor (Mufla, HD-1P) a 120°C durante 90 min (Anexo 1.3).
2. Llenar las 3 columnas con el adsorbente sin humedad.
3. Llenar el estanque de evaporación hasta una altura de 10 (cm).
4. Configurar la temperatura de solución deseada dentro del estanque (Baño termostático).
5. Esperar que se alcance la temperatura indicada en el paso anterior.
6. Apertura de la válvula de purga (V-2), para evitar el arrastre de condensado.
7. Cierre de la válvula de purga (V-2).
8. Apertura de la válvula (V-1) gradualmente hasta 6 [Bar].
9. Apertura de la válvula de flujo de aire (V-3) al sistema disecante.
10. Regulación de la apertura de la válvula de flujo de aire (V-3), hasta alcanzar el flujo deseado.
11. Monitorear constantemente las caídas de presión y flujo de la línea, sino regular con la válvula de flujo de aire (V-3).
12. Dejar operando el sistema continuamente durante 90 minutos, luego registre la diferencia de altura de nivel en el estanque.
13. Repita el proceso para diferentes condiciones a estudiar.

De esta forma se logrará operar el prototipo manejando las variables operacionales bajo las condiciones establecidas, obteniendo la tasa de evaporación en el área superficial del estanque mediante la diferencia de nivel de la salmuera antes y después de terminar el procedimiento.

En la Figura 16 se observa el estanque de evaporación funcionando:

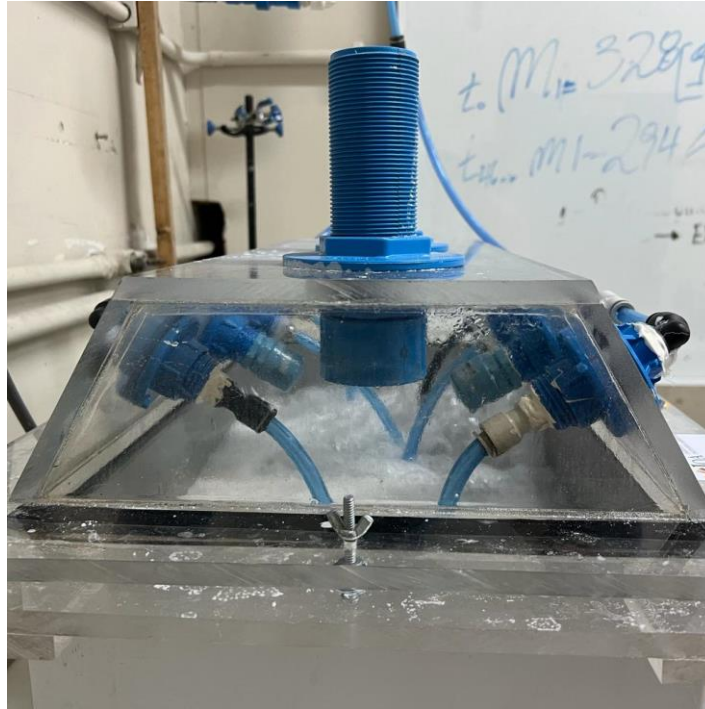


Figura 16: Estanque de evaporación operando correctamente

Prueba de concepto

Se llevo a cabo la evaluación de la capacidad de transferencia de humedad desde la salmuera a la burbuja seca, mediante el prototipo diseñado. Esto será evaluado mediante la diferencia del nivel del estanque a las condiciones de operación establecidas en la Tabla 8.

Tabla 8 Condiciones operacionales para la validación del prototipo

Flujo de aire (LPM)	Temperatura de solución (°C)
50	20
	40
150	20
	40
250	20
	40

Para la cuantificación de la tasa de evaporación del prototipo, se midió por diferencia de altura de nivel inicial y final, mediante una regla milimétrica, adherida a la pared del estanque. Por lo que la tasa de evaporación viene dada por la siguiente expresión (Ecuación 8):

$$Tasa_{evaporacion} = \frac{V_{evaporacion}}{A_{evaporacion} * t_{exp}} \quad (Ec. 8)$$

Según las variables de monitoreadas, queda como:

$$Tasa_{evaporacion} = \frac{(\Delta h * A_{estanque})}{A_{estanque} * t_{exp}} \left[\frac{L}{m^2 dia} \right]$$

Donde Δh corresponde a la diferencia de altura de salmuera dentro del sistema al inicio y final de la operación; $A_{estanque}$ corresponde al área superficial o transversal del estanque y t_{exp} como el tiempo de operación de la evaporación asistida de salmueras. Esta evaluación se realizará para los 2 parámetros sensibilizados; temperatura de solución y flujo de aire seco.

Comparación frente a la línea base de investigación

La comparación del prototipo piloto propuesto frente la línea base de investigación, que corresponde al proceso convencional de concentración de salmueras de litio con una tasa de evaporación de 8 [L/m²/día], es relevante a la hora de evaluar su desempeño. Esta comparación nos permitirá evidenciar la ventajas o desventajas del sistema diseñado, proporcionando un dato duro de la viabilidad técnica y valor agregado de la investigación.

Evaluación del rendimiento del prototipo

Se analizó la capacidad de transporte de humedad de las burbujas de aire seco hasta su saturación experimental, en comparación con la capacidad teórica establecida por la carta psicrométrica, mediante las propiedades del aire en función de la temperatura de bulbo seco y humedad relativa a la altura del mar. Que viene dada por la siguiente expresión (Ecuación 9):

$$V_{evap} = \frac{m_{aire} * (HA_{saturado} - HA_{seco})}{\rho_{H_2O}} \quad (Ec. 9)$$

$$V_{evap} = \frac{\left(\frac{F_{aire}}{V_{esp}} \right) * (HA_{saturado} - HA_{seco})}{\rho_{H_2O}} \left[\frac{L}{m^2 dia} \right]$$

Donde V_{evap} corresponde a la tasa de evaporación teórica calculada por la carta psicrométrica, m_{aire} se refiere a la masa de aire inyectada al estanque, que viene dado por el cociente entre el flujo F_{aire} y el volumen específico del aire, HA quiere decir humedad absoluta a condiciones de saturación máxima y mínima, ρ_{H_2O} corresponde a la densidad del agua, todo esto a las condiciones operacionales establecidas al comienzo del capítulo.

Capítulo 4: Resultados experimentales y análisis

En este capítulo, se observarán los resultados de la caracterización de la materia prima y el sistema de concentración de salmeuras mediante la inyección de burbujas secas implantado. Se analizará el efecto térmico (20°C, 40°C) a distintos flujos de aire (50, 150, 250 SLPM) y su evaluación frente al proceso convencional de concentración de litio mediante pozas de radiación solar. Se determinará el rendimiento del prototipo para las condiciones operacionales estudiadas.

Caracterización de la materia prima

Según la aplicación del modelo Rosin Rambler, la curva granulométrica de la silica gel se observa en el Grafico 5.

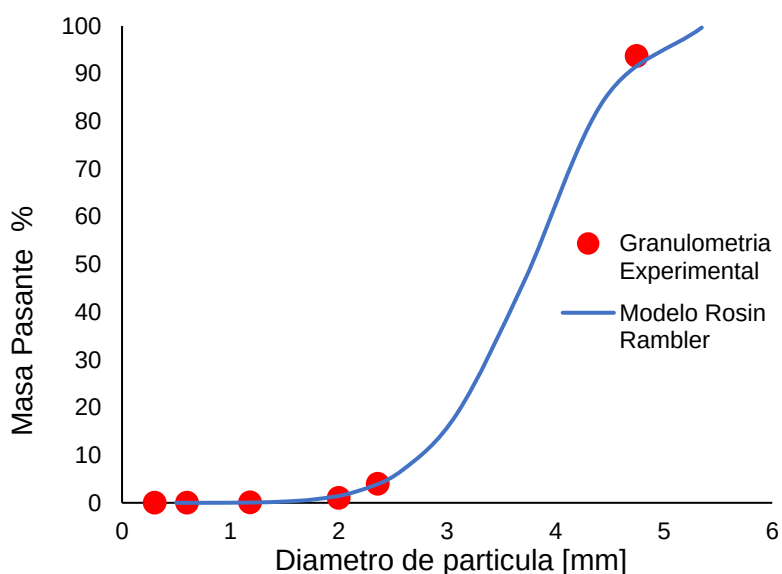


Gráfico 5: Granulometría de la silica gel mediante Rosin Rambler

Debido al comportamiento de la curva se determinó una granulometría monoclásica con un diámetro característico D10 de 2.7 [mm], con una densidad de 1.013 (kg/L) y una porosidad de lecho igual al 0.402 [ml/ml]

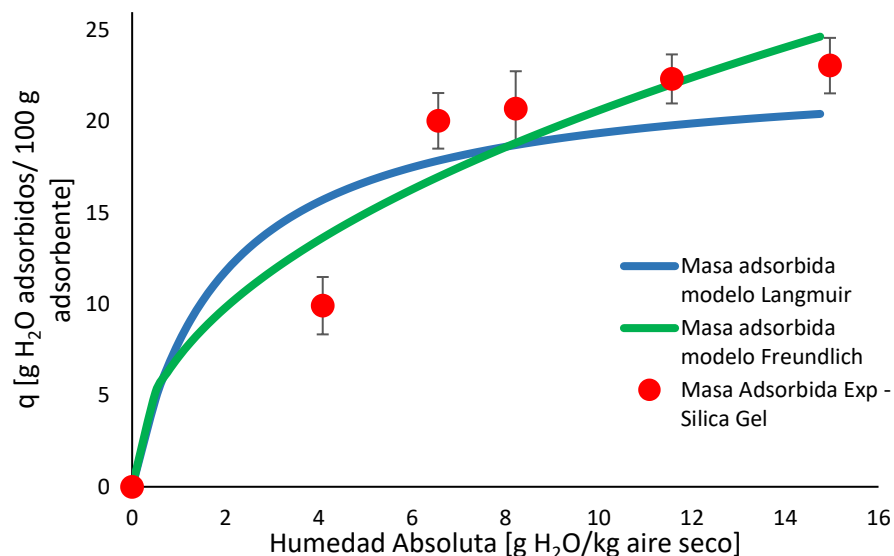


Gráfico 6 Isoterma de adsorción de la silica gel mediante el Modelo de Langmuir y Freundlich

En conclusión, luego de realizar el trabajo experimental correspondiente a la caracterización de la silica gel mediante la determinación de su isoterma de adsorción, se ha podido observar que los datos se ajustan de mejor manera al modelo de isoterma de Freundlich con un R cuadrado ajustado de 0.91 (Grafico 6), por lo que la adsorción de agua por parte del adsorbente viene dada por la Ecuación 4, parametrizada:

$$q = 7.13 * c^{0.46}$$

Lo cual tiene sentido, ya que la isoterma de Freundlich propone la existencia de múltiples capas alrededor del adsorbente, donde no todos los sitios activos muestran la misma afinidad hacia el adsorbato (Kalam et al., 2021). Esto cobra sentido al observar el comportamiento de la silica gel, donde es posible observar como el color de una esfera del adsorbente va cambiando por partes y no uniformemente.

La salmuera utilizada en el experimento fue caracterizada mediante un equipo multiparámetro Hanna HI5522. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 9.

Tabla 9 Características de la salmuera

Variable	Valor	Unidad
pH	7.557	-
Conductividad	105	mS/cm
Salinidad	354	%

Con estos resultados se tiene más claridad de cuáles son las condiciones en las que se realiza la transferencia de masa entre el medio húmedo (salmuera) y la burbuja seca.

A continuación, los datos recopilados y parámetros de adsorción calculados se utilizarán para llevar a cabo la simulación de la etapa disecante del prototipo mediante Aspen Adsorption V9, realizando una sensibilización de las variables críticas.

Curva de quiebre del sistema disecante

Según los resultados obtenidos, estamos en presencia de un adsorbente, donde su isoterma de adsorción se ve descrita mediante el modelo de Freundlich, sin embargo, fue necesario adimensionar los parámetros obtenidos, según las unidades del flujo de entrada, que para este caso son mol/s, por lo que la nueva curva de adsorción quedaría como se muestra el Grafico 7:

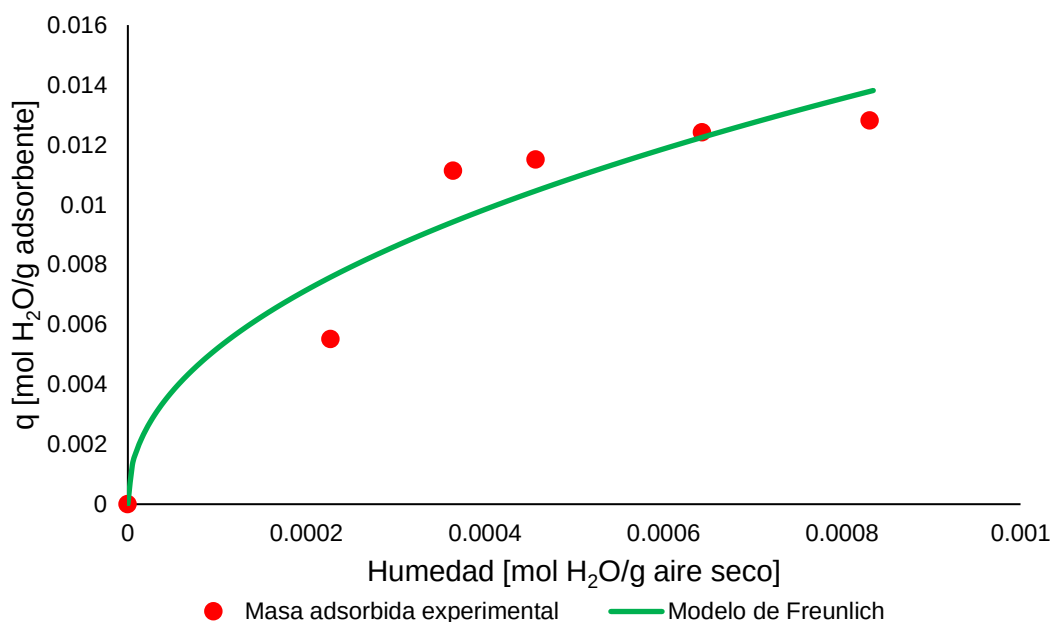


Gráfico 7: Isoterma de adsorción de Freundlich con coeficientes adimensionalizados

La isoterma de adsorción con parámetros adimensionales queda como:

$$q = 0.37 * c^{0.47}$$

A continuación, se observan las curvas de quiebre del sistema de adsorción implementado, al sensibilizar la temperatura y presión operacional.

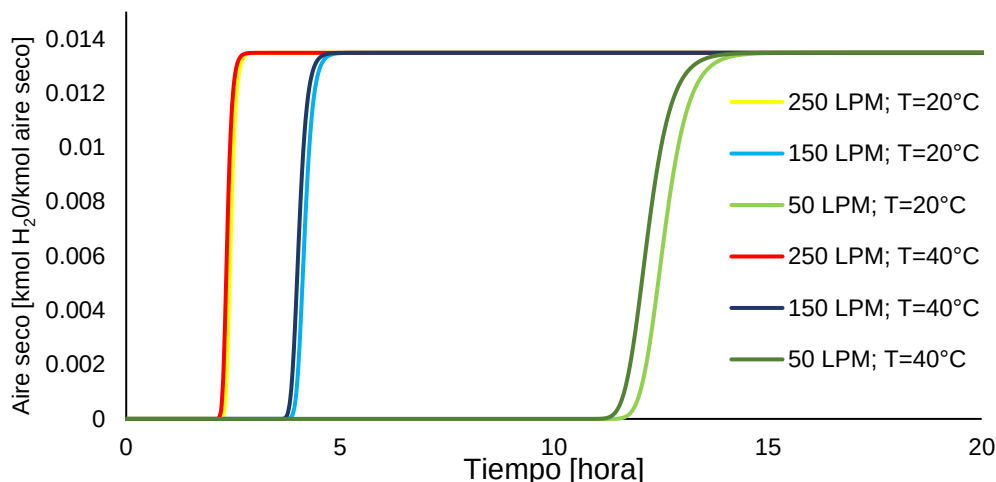


Gráfico 8: Sensibilización del sistema mediante la temperatura - Curva de quiebre

Del Gráfico 8, podemos concluir que no existe gran diferencia en la operación del sistema de adsorción al trabajar a 2 temperaturas distintas relativamente bajas, sino que la variable más relevante en el tiempo útil de operación es el flujo de aire con el que se opera.

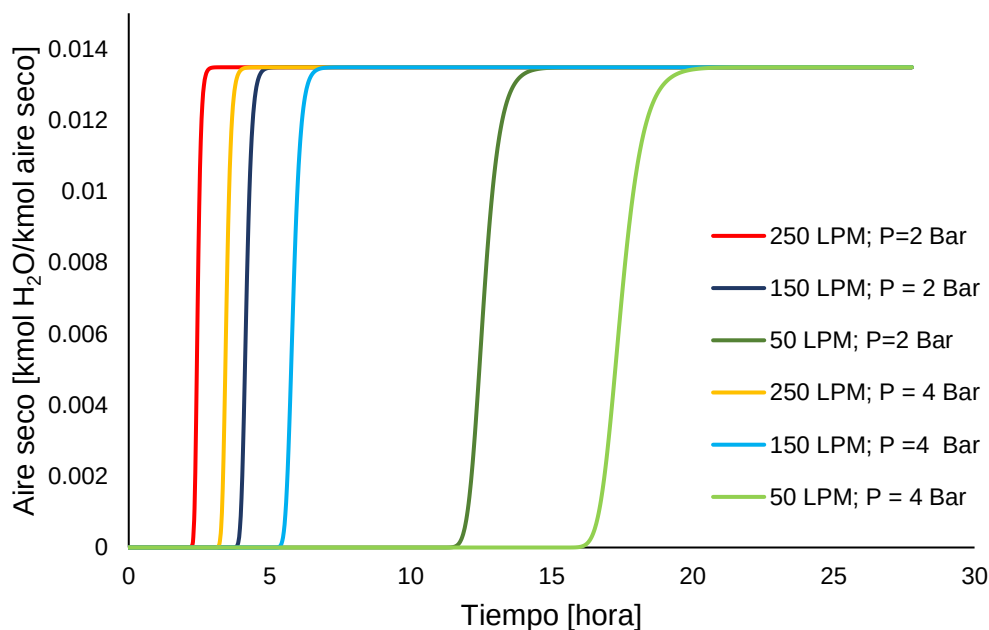


Gráfico 9: Sensibilización del sistema mediante la presión - Curva de quiebre

Como se puede observar en el Gráfico 9, existe una importante influencia en la presión de operación para un mismo flujo de operación, cuya relevancia aumenta al disminuir el flujo de operación del aire.

En conclusión, el máximo tiempo de operación con el que se puede operar para los flujos de aire establecidos es 2.5 horas, gracias a el tiempo de saturación del adsorbente frente al adsorbato del máximo flujo de operación de 250 LPM, por lo que se determina que el

tiempo de operación para las pruebas experimentales es de 1.5 horas, para todas las condiciones descritas.

Equipo experimental

A continuación, se puede cual fue el resultado final del diseño y la construcción de cada etapa del sistema de concentración de salmueras mediante la inyección de burbujas de aire seco propuesto.

En la Figura 17, se puede observar cómo se logró implementar el sistema disecante con un par de manómetros a la entrada y a la salida del sistema, asegurando la continuidad operacional del proceso.



Figura 17: Sistema de adsorción con sensores de presión (P-101, P-102)

Posteriormente, se construyó el tanque de evaporación en donde se implementaron 8 lanzas de punta porosa con conexión en NPT, con un techo de acrílico con sellado hermético, como se observa en la Figura 18.



Figura 18: Estanque de evaporación implementado

Finalmente se conectó el estanque a la línea de aire seco proveniente de la etapa disecante con un rotámetro para la indicar el flujo de entrada al sistema. A continuación, en la Figura 19, se puede observar el sistema instrumentado y listo para su evaluación.



Figura 19: Sistema implementado de evaporación de salmueras mediante burbujas secas

Análisis de resultados

En esta sección, se presentará la validación del prototipo propuesto a través de los resultados experimentales obtenidos (Anexo 1.4 – 1.5). El objetivo principal es comparar el desempeño frente al proceso convencional de concentración de salmueras, evaluar el desempeño frente a la capacidad teórica para transportar agua del aire seco según la carta psicrométrica para posteriormente evaluar la prefactibilidad técnica económica del escalamiento industrial.

Para el estudio del efecto de la velocidad superficial del aire en el proceso y su facilidad para el escalamiento del prototipo, se entregará la variable de flujo de gas en centímetros por segundo, según la siguiente expresión (Ecuación 10).

$$Jg = \frac{F_{aire}}{A_{estanque}} \quad (Ec. 10)$$

A continuación, en el Grafico 10 podemos observar el volumen evaporado por el prototipo en 90 minutos de operación.

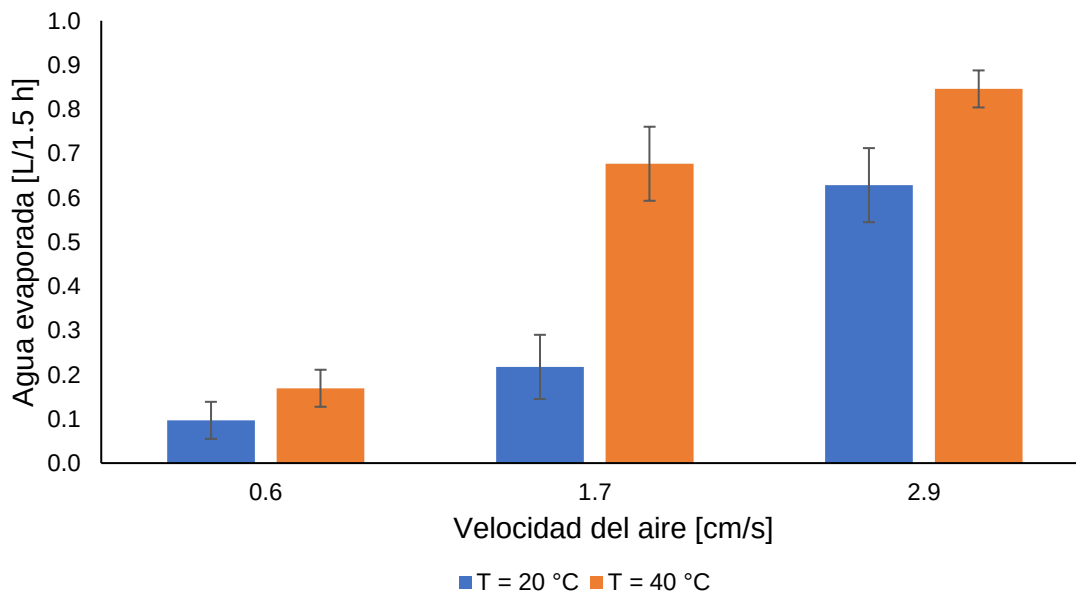


Gráfico 10: Resultados experimentales

Como se puede observar, existe una clara influencia del efecto térmico de la solución en el rendimiento del prototipo, ya que, al aumentar la temperatura de la solución, la tasa de evaporación se ve beneficiada.

A continuación, se procederá a evaluar el prototipo mediante indicadores de rendimiento.

- **Resultados frente a la línea base de investigación**

A continuación, en el Grafico 11, se observan los resultados obtenidos experimentalmente al comparar el desempeño del prototipo propuesto construido a escala piloto de evaporación asistida mediante inyección de burbujas secas, frente al proceso convencional de concentración de salmueras mediante pozas de radiación solar.

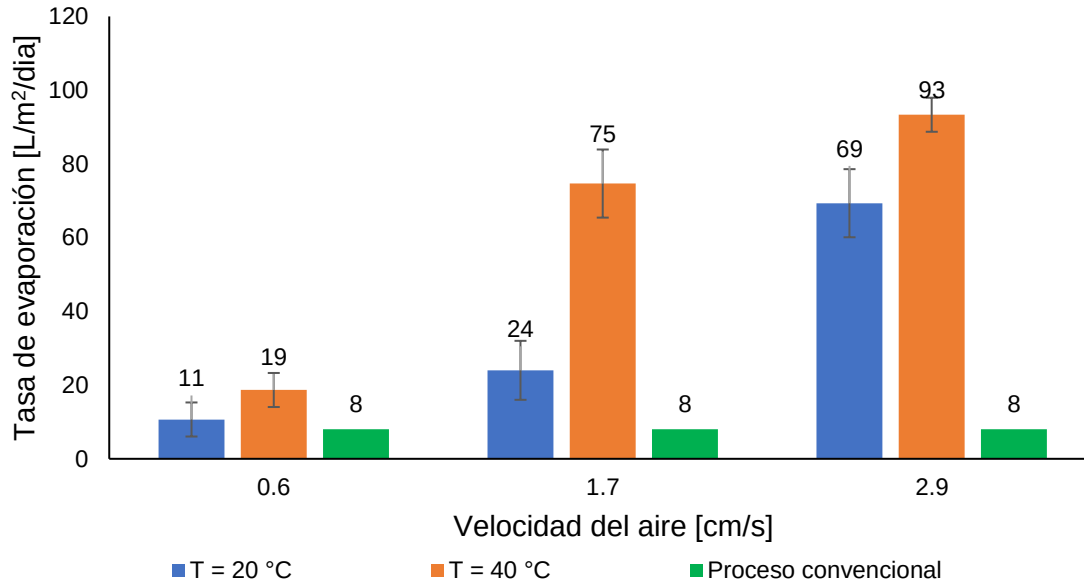


Gráfico 11 Evaluación del prototipo frente a la línea de investigación

Como se puede observar los resultados obtenidos por el prototipo demuestra una mejora relevante en términos de capacidad de evaporación, logrando una tasa de superior a la línea base en 2 a 9 veces , alcanzando incluso 93 [L/m²] diario, por lo que se comprueba el funcionamiento propuesto por la patente de inyección de burbujas secas para el aumento de la tasa de evaporación en salmueras (Guerra & Acuña, 2021), aplicado al sistema diseñado y construido.

Con el objetivo de extrapolar los resultados obtenidos, se procede a la modelación de la tasa de evaporación una temperatura de solución de 20 °C y 40 °C mediante una función exponencial y sigmoide, como se muestra en el Grafico 12.

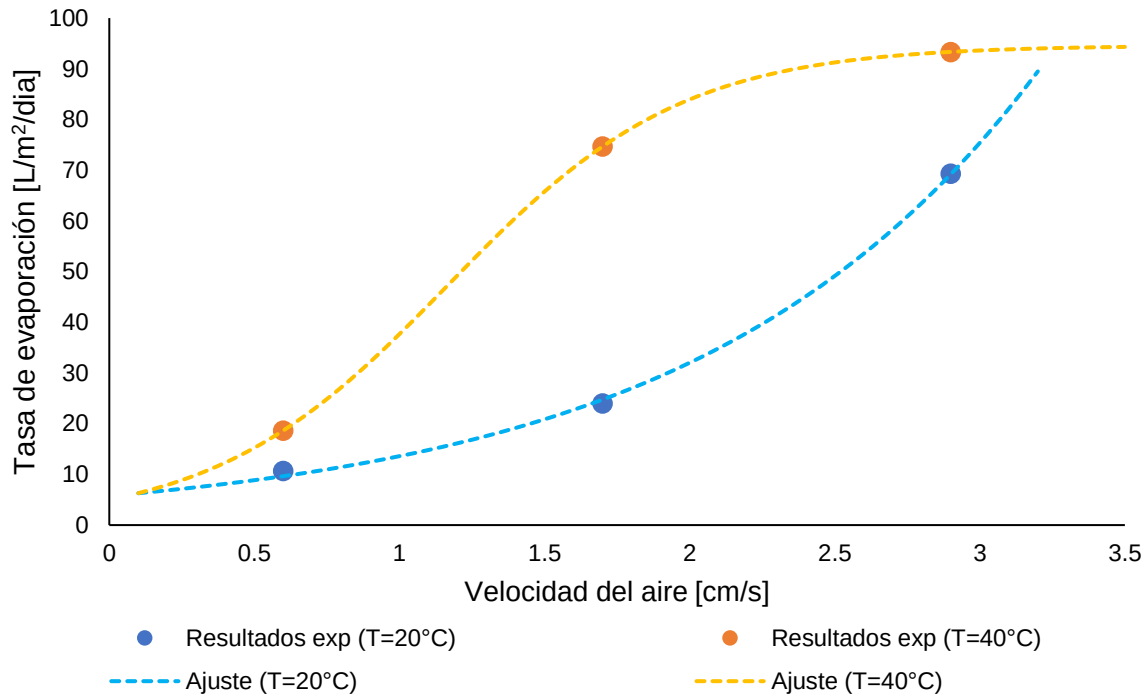


Gráfico 12: Ajuste de las tasas de evaporación del prototipo

Donde el ajuste viene descrito por las funciones parametrizadas en la Tabla 10:

Tabla 10 Ajuste de resultados del prototipo

T =20°C	T =40°C
$T_{evap}(Jg, T) = 5.77 * e^{0,85*Jg}$	$T_{evap}(Jg, T) = \frac{94.6}{1 + 18 * e^{-2.5*Jg}}$

- Resultados de la evaluación del rendimiento del prototipo**

Se realizará una evaluación del rendimiento del prototipo a dos temperaturas distintas, frente a la capacidad de transporte teórica dada por la humedad absoluta de la carta psicométrica a las condiciones de operación del laboratorio sensibilizando la velocidad superficial del gas.

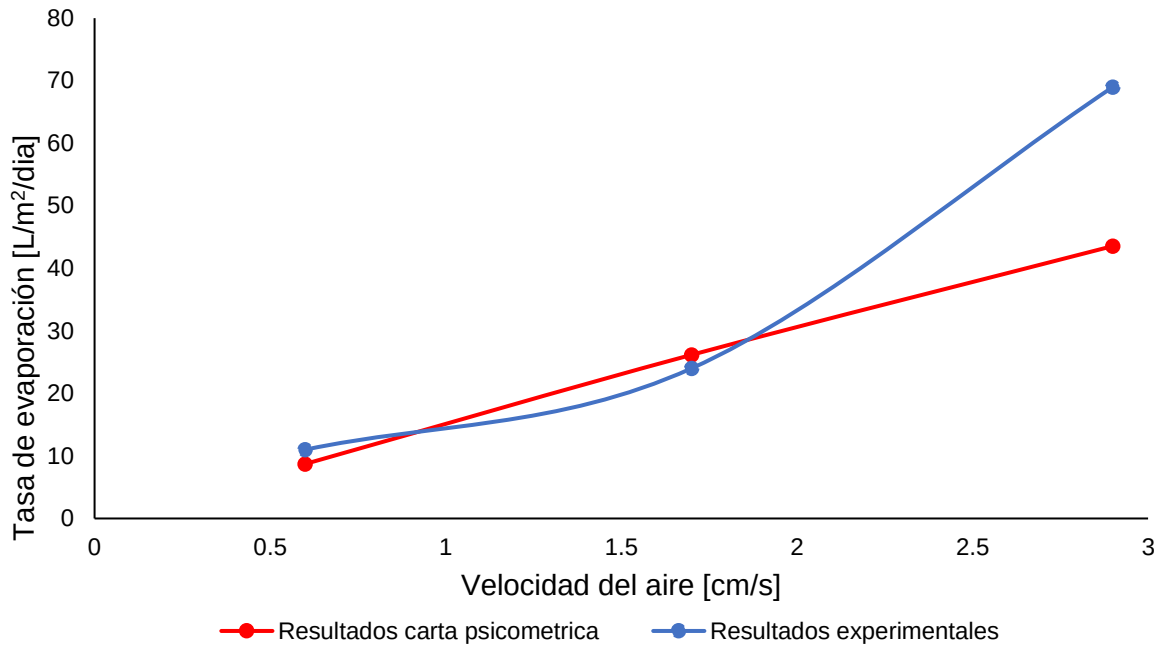


Gráfico 13: Evaluación del rendimiento del prototipo (T=20°C)

Como se puede observar en el Gráfico 12, al no aplicar el efecto térmico en el proceso de humidificación de burbujas secas, la variable sensibilizada es la velocidad superficial de burbuja, en donde se puede concluir que al aumentar el flujo el gas, aumenta la tasa de evaporación, debido al efecto en el gas hold up del estanque, aumentando la transferencia de masa en columnas de burbuja gas líquido (Letzel et al., 1999), esto puede ser consecuencia del efecto de agitación, generando una mezcla uniforme dentro del estanque, adicionalmente aumentando la turbulencia del sistema, lo que beneficia la transferencia de materia (Devakumar et al., 2010). La sobre eficiencia del sistema a altas velocidades se cree que se debe al efecto de explosión de la cama de burbujas lo que genera evaporación por arrastre por flujo de aire en las paredes.

En el siguiente análisis se estudiará el impacto del factor térmico en el proceso de evaporación, mediante un aumento de la temperatura de la solución a 40 [°C].

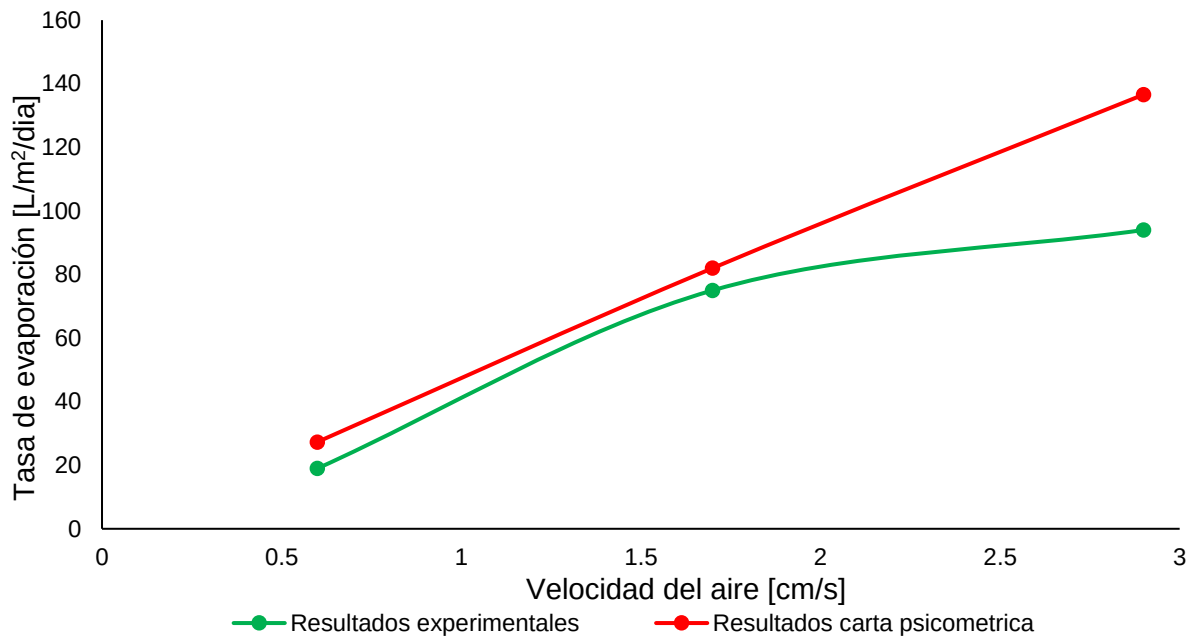


Gráfico 14: Evaluación del prototipo (T=40°C)

Como se puede observar en el Gráfico 14, al igual que en el Gráfico 13. al aumentar la velocidad superficial del aire, la tasa de evaporación aumenta, sin embargo, se mantiene bajo la saturación dada por la carta psicométrica e incluso pierde eficiencia a altas velocidades. Esto puede ser consecuencia de la disminución de la viscosidad de la interfaz del gas y el medio acuoso, aumentando la coalescencia de las burbujas, además aumenta la capa de burbujas en la superficie del estanque o “gas Hold up” afectando la saturación de humedad de la burbuja.

Capítulo 5: Escalamiento a aplicación industrial

Para el desarrollo de un proyecto, es crucial evaluar el escalamiento industrial, lo que implica estudiar distintos factores que afectan la viabilidad técnica y económica para la transición a partir de la escala piloto del prototipo. Para esto se obtiene el indicador de rendimiento del costo por metro cubico de agua evaporada y recuperada, además de una estimación del costo de inversión por unidad del sistema a escala industrial. Se considera el siguiente diagrama de flujo de procesos inicial en la Figura 20, el cual será validado posteriormente, para un estanque de evaporación con un área superior de 12 m^2 como se observar en la Figura 21 con dimensiones especificadas en el Anexo 1.6 y una salmuera con las características detalladas en el Anexo 1.7. Finalmente se concluirá la rentabilidad del proyecto mediante una estimación del flujo de caja para la implementación del proyecto a 20 años.

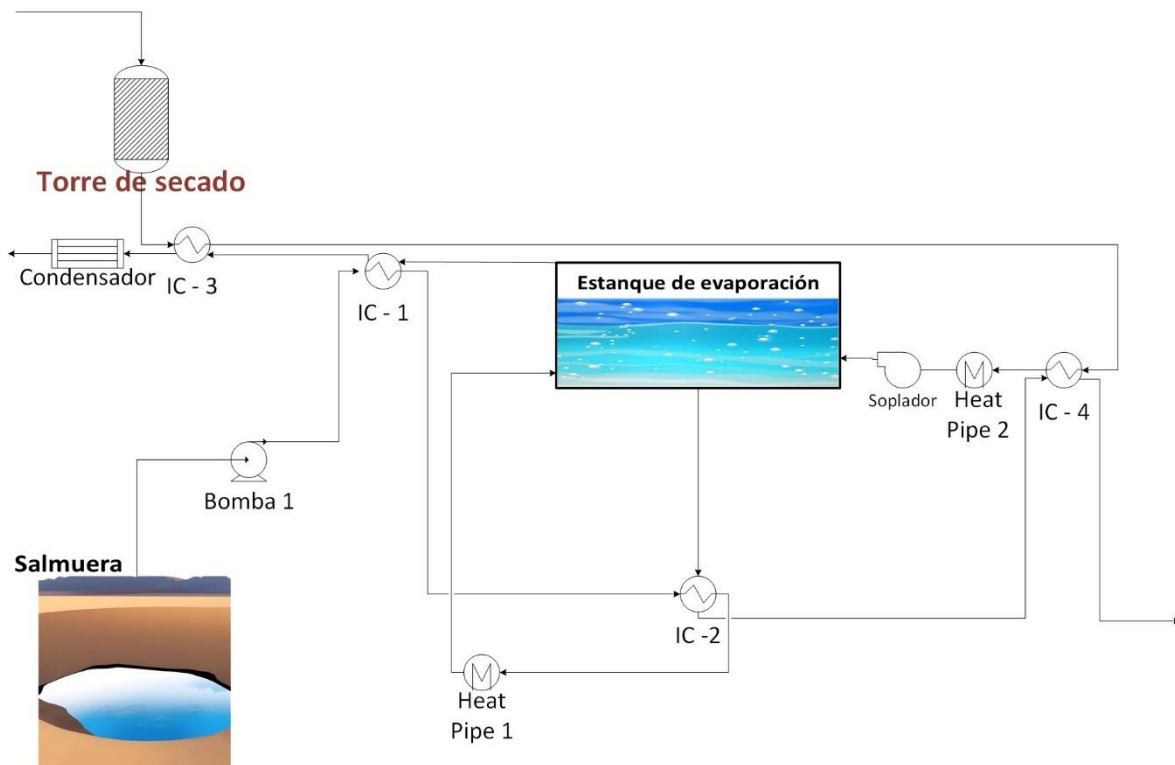


Figura 20: Diagrama de flujo del escalamiento industrial del prototipo

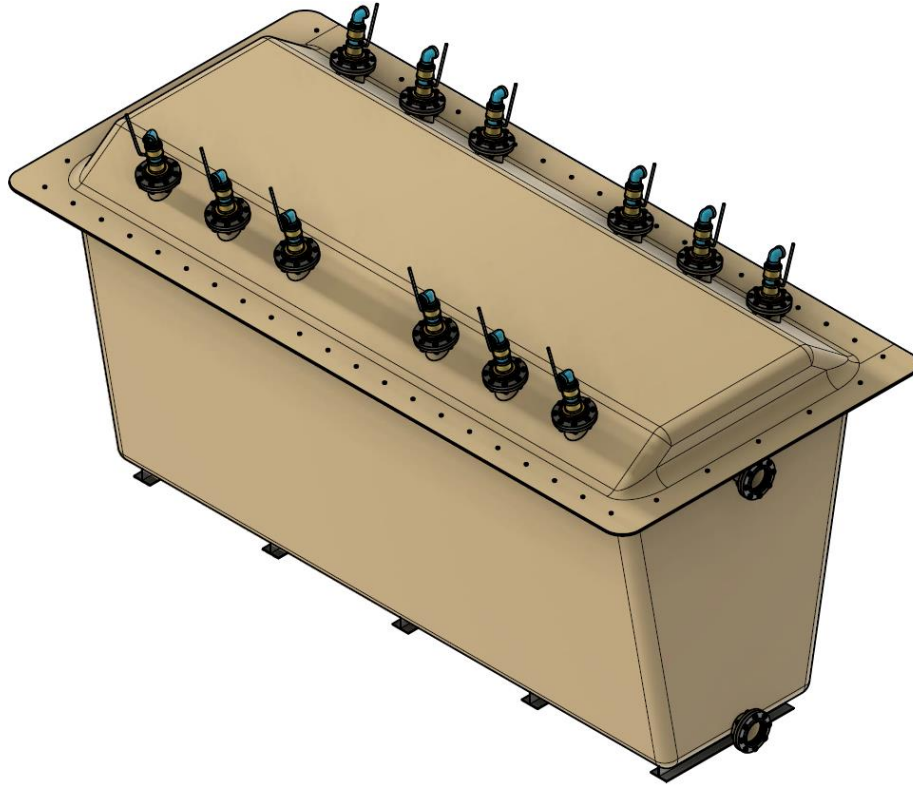


Figura 21: Estanque de evaporación a escala industrial (Equipo de ingeniería, Dpto. IQA, USM)

El escalamiento industrial busca la eficiencia energética del proceso, aumentando la temperatura de la salmuera y el aire mediante 4 intercambiadores de calor de flujo cruzado (IC), además de 2 Heat pipe o calentadores de tubo, para compensar la energía faltante para la temperatura de operación propuesta por el sistema. El movimiento de los flujos se realiza mediante una bomba centrífuga y un soplador rotativo, considerando también el proceso de secado de aire mediante adsorción. Sin embargo, es importante considerar que el flujo de aire húmedo a la salida del estanque puede no alcanzar las condiciones requeridas para condensar el agua y recuperarla, por esto se agrega un condensador al final de la línea.

Se desarrollo un simulador en el Software de cálculo Microsoft Excel versión 365, para minimizar la energía de los Heat pipe, variando las temperaturas de entrada y salida ($\Delta T_1, \Delta T_2$) de los intercambiadores de calor, suponiendo que la energía entregada y recibida por ambos flujos es la misma dependiente de la capacidad calorífica (Cp_1, Cp_2) del flujo del fluido (F_1, F_2), mediante la Ecuación 11:

$$F_1 * Cp_1 * \Delta T_1 = F_2 * Cp_2 * \Delta T_2 \quad (Ec. 11)$$

Además, se realizó el cálculo del área de transferencia de calor (A_{trans}) de los 4 IC (Ecuación 11), a partir de distintos flujos de salmueras para validar el diseño propuesto en la Figura 21, en donde se obtuvo que el intercambiador N°3 ocupa más del 95% del área

de transferencia dependiente del coeficiente global de transferencia de calor (U) y la diferencia de temperatura media logarítmica ($LMTD$), sin embargo, el intercambiador N°2 se considera debido a la relevancia de ese delta de temperatura generado, por lo que se descartan los otros.

$$A_{trans} = \frac{Q}{U * LMTD} \quad (Ec. 12)$$

Es importante considerar la pérdida de energía (ΔH_{evap}) por parte del agua al cambiar de fase ($m_{salmuera.evap}$), provocando un delta de energía en el aire que entra y sale del estanque, por esta afectará a la estabilidad de la temperatura de operación, según la siguiente ecuación (Fan et al., 2018):

$$m_{salmuera} * C_{p_{salmuera}} * (T_{op} - T_{sobrecalentada}) + \Delta P = m_{salmuera.evap} * \Delta H_{evap} \quad (Ec. 13)$$

Mediante el simulador se obtienen la curva de la variación de la temperatura de entrada de salmuera ($T_{sobrecalentada}$) al estanque dependiendo de su flujo ($m_{salmuera}$), además del aporte energético para por la columna de agua (ΔP) entre la entrada y salida del aire, para una temperatura de operación (T_{op}) del estanque de evaporación de 20 °C (Grafico 15) y 40°C (Grafico16).

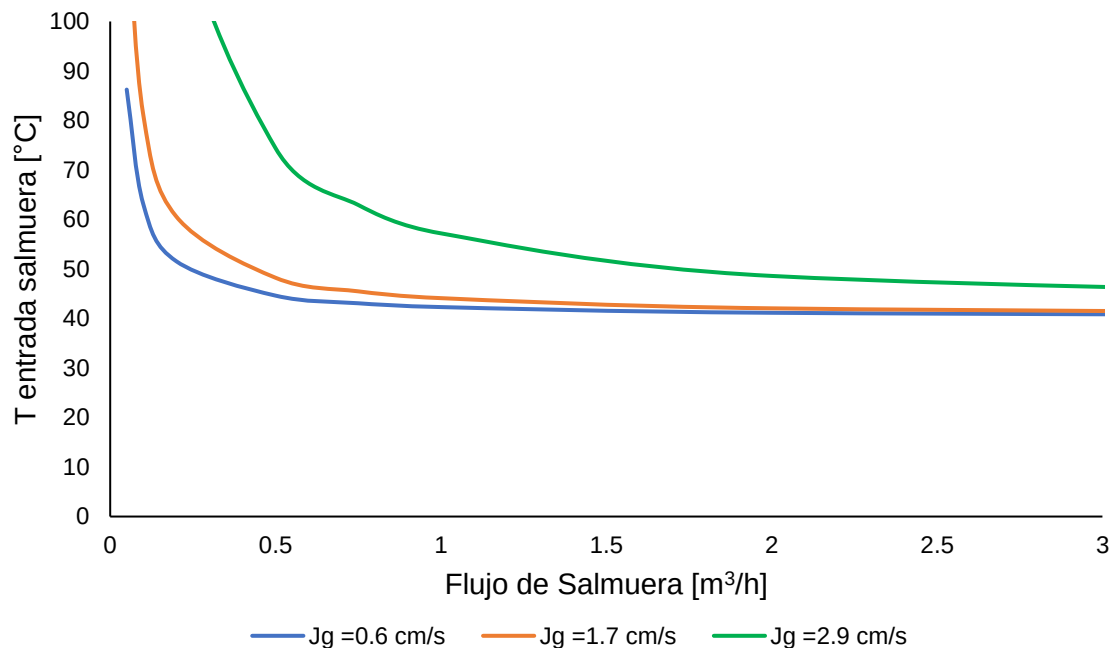


Gráfico 15: Variación de la temperatura de entrada de la salmuera al estanque de evaporación para una temperatura estable de operación de 20°C

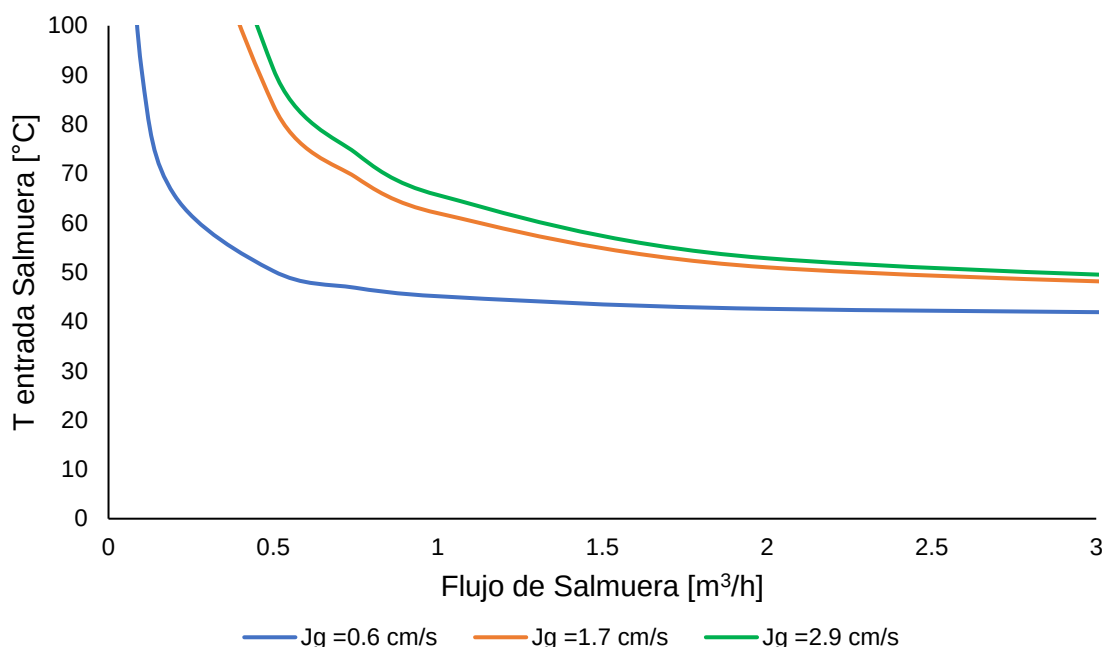


Gráfico 16: Variación de la temperatura de entrada de la salmuera al estanque de evaporación para una temperatura estable de operación de 40°C

A partir de los gráficos 15 y 16 podemos obtener los rangos operacionales del equipo, determinando 70 °C como temperatura máxima para el flujo de entrada de la salmuera al estanque. Los rangos operacionales se observan en la Tabla 11:

Tabla 11: Rangos de operacionales del flujo de salmuera en prototipo propuesto a escala industrial

Temperatura de operación [°C]	Velocidad del aire [cm/s]	Rangos operacionales de flujo de salmuera [m³/h]
20	0.6	[0.1 - 5]
	1.7	[0.2 - 5]
	2.9	[0.75 - 5]
40	0.6	[0.2 - 5]
	1.7	[0.75 - 5]
	2.9	[1 - 5]

Costo de operación

Con los rangos operacionales entregados en la tabla anterior se estima el costo por metro cubico de agua evaporada y recuperada para una temperatura de 20 °C y humedad relativa 20% ambiental en el salar de atacama, aplicando el diagrama de proceso propuesto en la Figura 23 para una temperatura de operación de 40°C y un sistema sin reintegración de energética de 20 °C dentro del estanque de evaporación, considerando un precio de \$2.5 CLP o 0.0031 USD por kWh según la Comisión Nacional de Energía (CNE) y el consumo

energético por parte del soplador y una bomba centrífuga, a continuación se obtiene el siguiente OPEX.

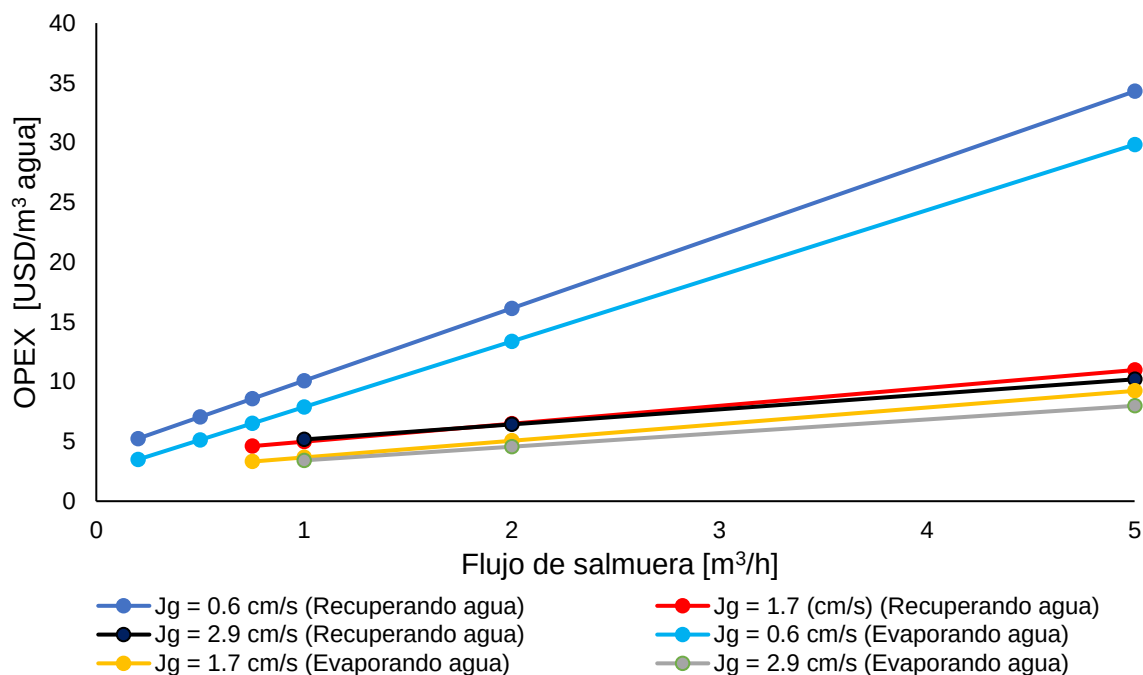


Gráfico 17: Costo de operacional del prototipo propuesto a escala industrial con reintegración energética con una temperatura de operación de 40 °C y distintos flujos de salmuera

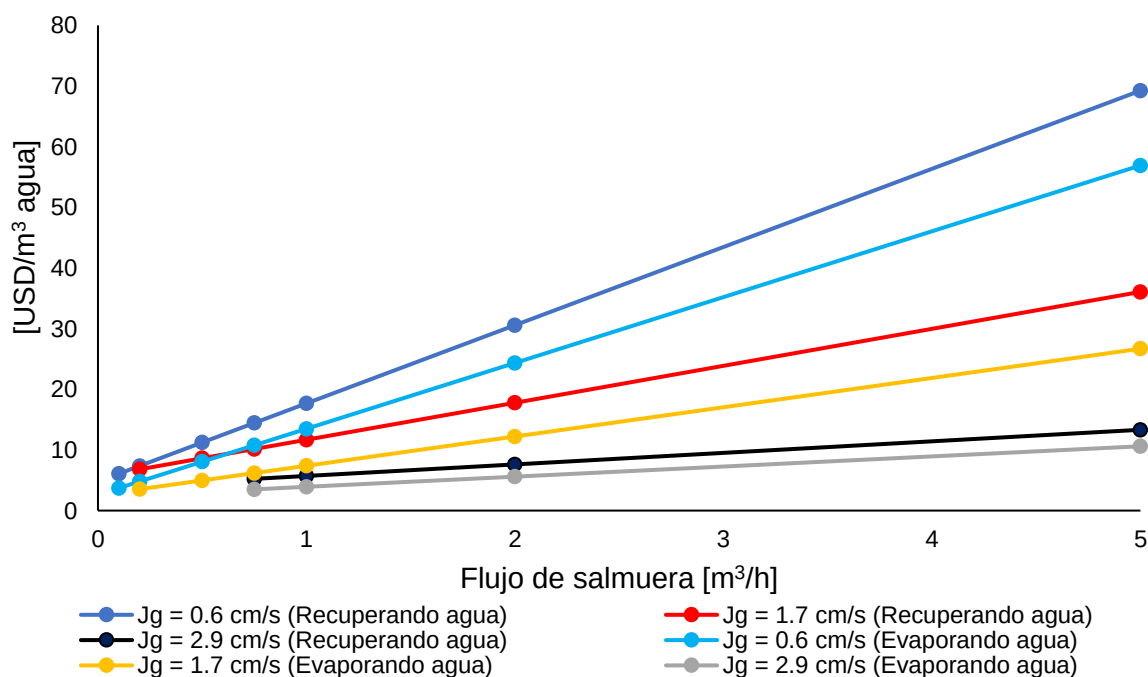


Gráfico 18 Costo de operacional del prototipo propuesto a escala industrial con reintegración energética con una temperatura de operación de 20 °C y distintos flujos de salmuera

La opción más viable dentro de lo observado en el Grafico 17 y 18 es optar por una velocidad de aire de operación a 2.9 (cm/s), sin embargo, observando la eficiencia frente operacional del prototipo (Grafico 11 y 12) de determina que la óptima operación se encuentra la inyección de aire de 1.7 [cm/s] a 40 °C con un costo operacional de 3 a 9 [USD/m³ de agua evaporada] y de 5 a 11 [USD/m³ de agua recuperada], dependientes del flujo de salmuera inyectado al estanque.

Como segundo análisis, se utiliza la información de la Tabla 11 para determinar el flujo de salmuera operativo, el cual se establece en 1 [m³/h] debido a que este flujo funciona para todos los escenarios propuestos. Utilizando las curvas de extrapolación derivadas de los resultados de las tasas evaporación obtenidas a partir de distintas velocidades de inyección de aire y temperatura de solución del prototipo, como se detallan en la Tabla 10, es posible estimar la variación del costo operacional por metro cubico de agua evaporada o recuperada a un flujo constante de salmuera a distintas velocidades de inyección de aire. Este análisis considera la energía utilizada para impulsar ambos flujos. A continuación, en el Grafico 19 se observan estos resultados.

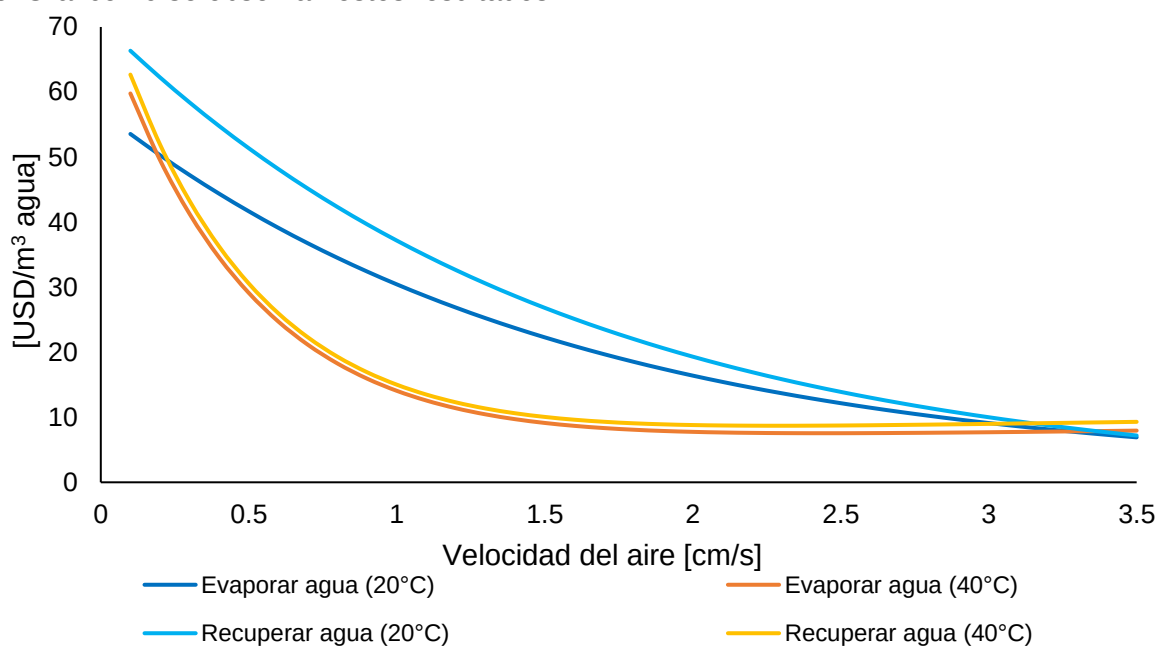


Gráfico 19: Costo operacional del prototipo propuesto a escala industrial con una temperatura de operación de 20 y 40 °C a un flujo de 1 [m³/h] de salmuera y distintas velocidades de inyección de aire

Como conclusión de los gráficos 17, 18 y 19, el mejor escenario para la operación del prototipo propuesto es un flujo de 1 [m³/h] y una temperatura de solución de salmueras de 40 [°C], con una velocidad de inyección de aire de 1.7 [cm/s] (optimo operacional), recuperando el recurso hídrico con un costo de 8 USD por metro cubico de agua evaporado.

Costo de equipos

Se lleva a cabo una cotización detallada de los equipos limitantes y cruciales para la implementación del proyecto a escala industrial, de manera de entregar un costo de inversión referencial, el detalle se observa en la siguiente Tabla 12:

Tabla 12: Costo de inversión de la tecnología a escala industrial

Equipo	Unidad	Precio USD	
		Unitario	Total
Columna de adsorción	1	14950	14950
Soplador	1	1902	1902
Estanque de fibra de vidrio	1	6800	6800
Vigas de fierro	5	340	1700
Inyectores de aire	6	780	4680
Bomba centrífuga	1	130	130,79
Total			30163

El costo de inversión de esta tecnología se estima en 30,000 (USD), sin embargo, este valor puede variar dependiendo de la calidad de los equipos, especialmente de la bomba la cual debe contar con la capacidad para trasladar agua con alta concentración de sales, sin generar incrustaciones.

Flujo de caja

Con el objetivo de evaluar la factibilidad económica de implementar la tecnología propuesta en la industria del litio, se realiza una estimación del flujo de caja para la operación de 1 [m³/h] de salmuera, una velocidad de inyección de aire de 1.5 [cm/s] y una temperatura interna del estanque de 40 °C, con un costo operacional de 10 USD por metro cubico de agua evaporada, sensibilizando la cantidad de estanques de evaporación de 12 m² reemplazando porcentualmente el área de las pozas de evaporación de 53.5 [km²].

- **Cálculo de ingresos**

Para la estimación de los ingresos, se toma la producción de litio hasta el 2022 estimada en 39 [kt] con un aumento anual (A) dada por la Ecuación 14, por el precio del litio que se fija en 45 kUSD por tonelada de litio, alrededor del 50% del máximo valor que tuvo en el año 2022 (Grafico 5), debido a que no se puede realizar una estimación del valor del litio por la alta oscilación en su precio. No se incluye el potencial ingreso por agua desalada obtenida.

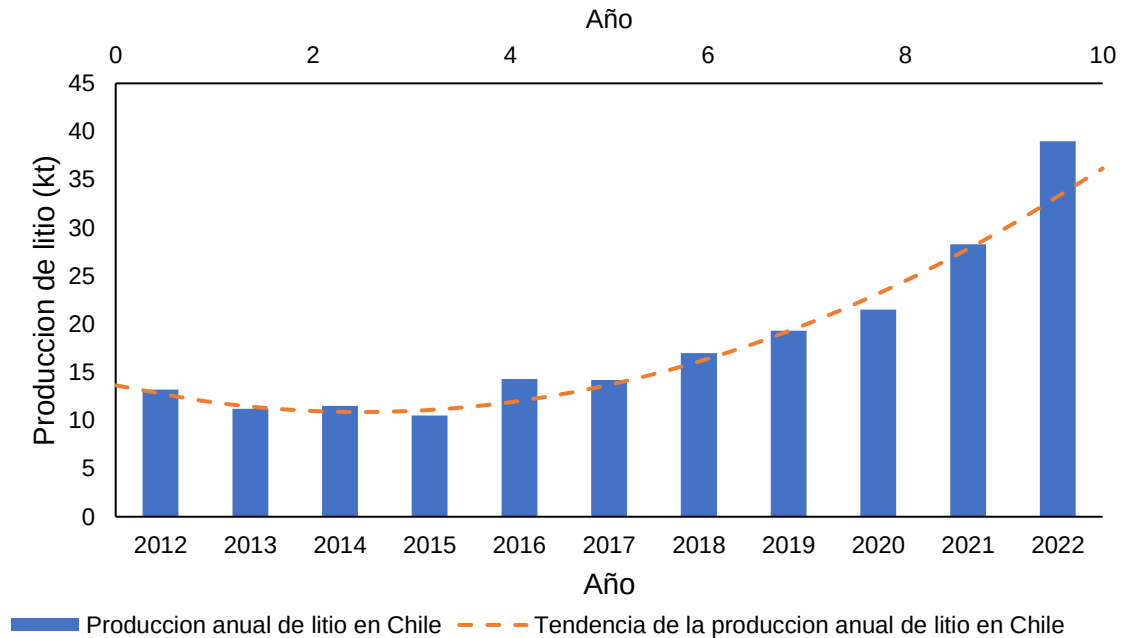


Gráfico 20 Tendencia de la producción de litio en Chile

$$Produccion_{Li} = 0.4481 * A^2 - 2.2295 * A + 13.645 \text{ (Ecuación 14)}$$

$$R^2 = 0.96$$

Al implementar el proyecto se considera un aumento de la producción de litio proporcional al aumento de la tasa de evaporación por el porcentaje de área de pozas reemplazada por los estanques de evaporación acelerada.

La evaluación NO considera los ingresos por venta del agua recuperada, a pesar de que se espera un flujo de agua de buena calidad (desalada), sin embargo, se espera contar con un piloto para evaluar este aspecto.

- **Cálculo de egresos**

Los costos se dividen en fijos y variables.

- **Costos fijos**

Los costos fijos de la implementación de este proyecto consideran la energía eléctrica necesaria para que el equipo opere de manera automática, la cual se estima en 2500 [USD/año] por estanque.

- **Costos variables**

Los costos variables consideran la mantención anual de los equipos aplicados en la tecnología, los cuales son estimados como el 1% de la inversión en equipos.

- **Inversión del proyecto en equipos e instalaciones**

Como se detalla en la tabla 12, se contempla un costo de 30,163 USD por estanque, además de un valor adicional de 10,000 USD para su construcción.

- **Criterios de evaluación del flujo de caja**

Para la evaluación de un flujo de caja de deben fijar distintos criterios y supuesto para determinar la viabilidad del proyecto. Los criterios por considerar son la tasa de descuento, el tiempo proyectado para la implementación del proyecto y la depreciación de los equipos. No se consideran los ingresos por potencial venta del agua recuperada.

- **Tasa de descuento**

La tasa de descuento viene dada por el nivel de riesgo del proyecto y por la inversión requerida para su realización. Se considerará una tasa del 12% debido a que el proyecto de desarrolla en la industria minera y 30% por ser un proyecto que se encuentra en TRL 5, lo que implica un mayor riesgo por la falta de su escalamiento industrial.

- **Tiempo del proyecto**

El proyecto se considerará para un funcionamiento de 10 años, por presentarse como una tecnología de transición frente a los métodos de extracción directa de Litio.

- **Depreciación de los equipos**

La depreciación considerada para este flujo de caja es lineal con valor residual a 20 años.

- **Impuesto a la utilidad**

Se considera el Impuesto Específico a la Minería (IEAM), el cual varía anualmente. Se estableció un valor fijo del 25% como referencia para el cálculo de costos y utilidades proyectados

- **Numero de estanques**

Con el objetivo de evaluar la influencia de la implementación de este proyecto en la industria del litio, se llevará a cabo un análisis de sensibilidad el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto en función de la cantidad de estanques de evaporación, considerando 3 escenarios: 100, 200, 400 estanques. Esto permitirá comprender como varía la rentabilidad del proyecto frente a la capacidad de procesamiento de salmuera.

Análisis de los indicadores de rentabilidad

Los indicadores de rentabilidad que se utilizaron para evaluar el proyecto propuesto son el VAN (Valor Actual Neto), que indica la rentabilidad de la inversión (un VAN positivo indica rentabilidad), el TIR (Tasa Interna de Retorno) que es la tasa donde el van se hace cero y el Payback que muestra el año en que se recupera la inversión. Los resultados de los flujos de caja (Anexo 1.8 – 1.10) se detallan en la Tabla 13.

Tabla 13 Resultados de los indicadores de los flujos de caja

	Tasa de descuento (12%)			Tasa de descuento (30%)		
Cantidad de estanques	100	200	400	100	200	400
TIR				11%		
VAN (MUSD)	\$-0.4	\$-0.8	\$-1.5	\$-3	\$-6	\$-12
Payback	Año 12	Año 12	Año 12	-	-	-

Como se puede observar, en el caso de una tasa de descuento comúnmente usada para los proyectos mineros, se logra no se logra la rentabilidad a medida que se implementa un mayor número de estanques, con un periodo de recuperación a los 12 años al igual que para para una tasa del 30%.

En conclusión, lo resultados indican que el proyecto no es rentable, por lo que resulta fundamental escalar el prototipo para observar su comportamiento en un entorno real. Esta etapa de implementación a mayor escala será crucial para confirmar la efectividad y la eficiencia de la tecnología propuesta, así como para evaluar su impacto en la industria del litio.

Capítulo 6: Conclusiones recomendaciones

Conclusiones

- Se demuestra que la tecnología a escala de laboratorio contempla un estanque de evaporación e inyección de aire seco mediante una etapa disecante con tiempos de operación entre 2 a 12 horas, logrando controlar las variables operacionales de temperatura de solución y velocidad de inyección del aire, lo que cumple con los requerimientos mínimos para realizar las pruebas de concentración.
- Se concluye que en el prototipo implementado existe una transferencia de masa desde el medio húmedo a través de la interfase de la burbuja hasta el medio seco, aumentando la tasa de evaporación en salmueras de litio, por lo que este método se presenta como alternativa para acelerar el proceso productivo del litio siendo una tecnología de transición frente a nuevos métodos de extracción directa como adsorción, osmosis inversa.
- La operación del sistema construido permitió validar de manera exitosa el funcionamiento de la tecnología propuesta, por lo que se alcanzó el quinto nivel de madurez de la tecnología (TRL5), sobre pasando 11 veces las capacidades del proceso convencional de concentración de litio. Estos resultados positivos confirman la viabilidad del diseño propuesto, lo que nos permite avanzar desde su implementación a nivel de laboratorio hacia su próximo escalamiento industrial.
- La evaluación económica indica que el proyecto no es viable, para un escenario sin recuperación de agua desalada y donde las condiciones de operación optimas son de 1 [m³/h] de salmuera, una velocidad de inyección de aire de 1.7 [cm/s] y una temperatura de solución de 40 [°C], con un costo estimado de 8 [USD/m³ de agua evaporada] y 8.5 [USD/m³ de agua recuperada], con un costo de inversión por unidad de 30,000 [USD]. Los indicadores de rentabilidad confirman el potencial de esta nueva tecnología en la industria de la minería del litio, con un VAN de -1.5 MUSD y un TIR del 11% para la implementación de 400 estanques.
- El proyecto es factible técnicamente, pero requiere un escalamiento a TRL 8, incorporando en la evaluación la recuperación de agua.

Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones y proyecciones derivadas de este trabajo buscan mejorar y proponer alternativas para fortalecer la implementación y eficiencia de la tecnología desarrollada. Se sugiere la automatización del sistema, con un control continuo de las variables operacionales para optimizar el rendimiento del proceso. Además, se considera un estudio fenomenológico del sistema bifásico difusivo y sus variables limitantes, como el tamaño de burbuja dependiente de la temperatura del gas, concentración de salmueras, y velocidad de inyección.

Respecto al prototipo se sugiere crear un sistema para calentar el aire de inyección, observando como esto afecta en el efecto difusivo de la humedad dentro y en la evaporación en la interfase de la burbuja, el cual a su vez es controlado con un sistema de medición continuo de sensores de temperatura con control en cascada a válvulas de flujo, para el manejo de la temperatura interna del estanque de evaporación.

Para el estudio fenomenológico, se sugiere repetir la operación de la tecnología con salmueras con distintas concentraciones provenientes de las pozas de litio, para el estudio de tamaño de burbuja, el cual se puede llevar a cabo mediante la construcción de un estanque hecho de acrílico en su totalidad, con un sistema fotográfico de alta resolución y velocidad de obturación.

Se requiere un estudio económico en profundidad, que evalúe el incremento de la tasa de evaporación en las pozas sobre la producción de litio y su repercusión en el mercado, mediante el previo escalamiento industrial del proyecto.

Finalmente, se debería minimizar la principal problemática que presenta la implementación de esta innovación disminuyendo la cristalización de sales dentro del estanque y determinar sus efectos en la operación, como la posible obstrucción de los inyectores de gas o tuberías, por lo que se propone la instalación de un sistema de tornillos sin fin en la zona inferior del estanque con la capacidad de extracción de estas sales.

Evaluar un escenario con recuperación de agua y el sistema de recolección y distribución.

Bibliografía

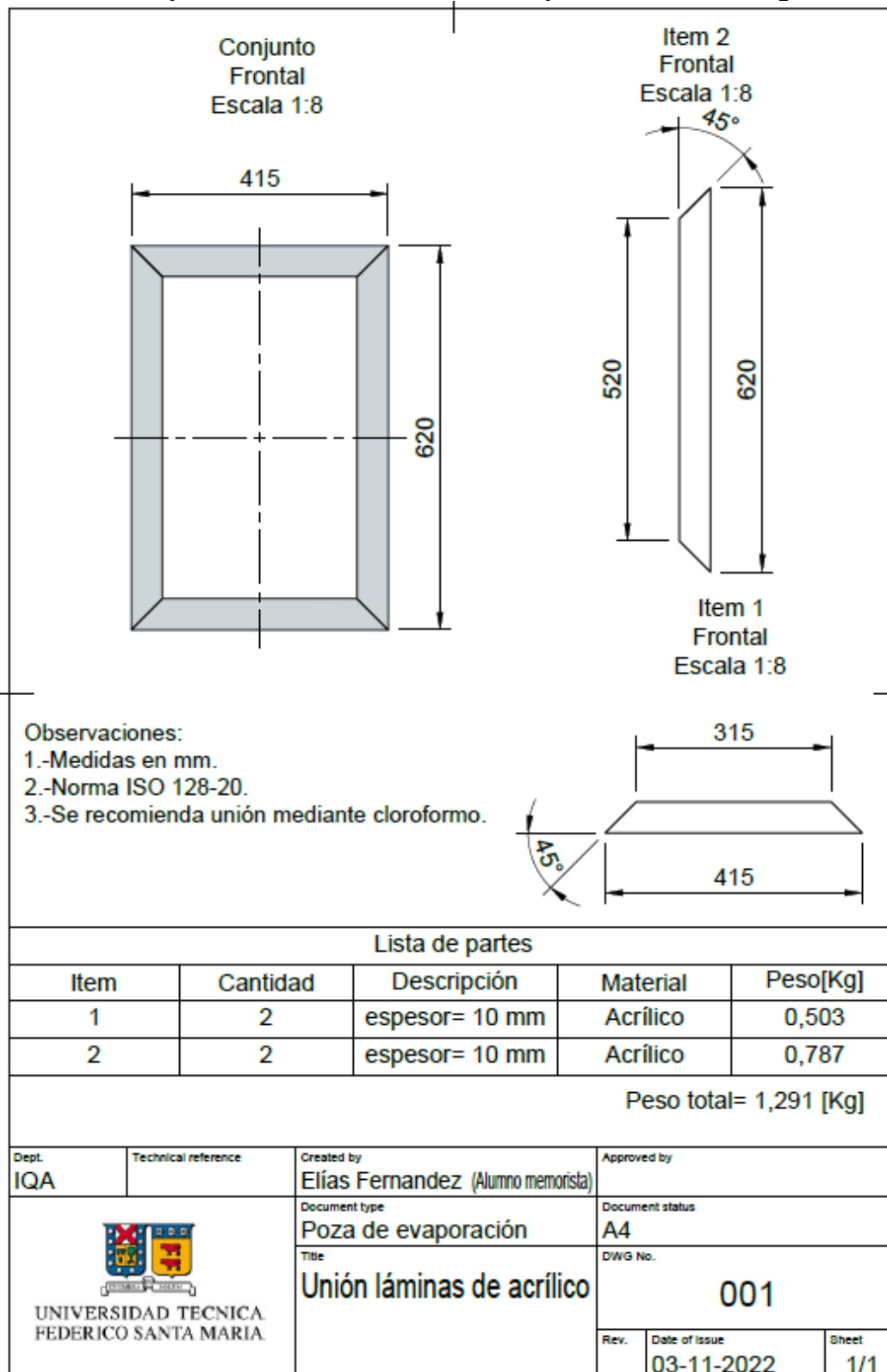
- [1] Agencia Internacional de Energía (IEA). (2021). *Global EV Outlook 2021*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
- [2] Andrés González & Jorge Cantallop. (2021). *El mercado de litio, Desarrollo reciente y proyecciones al 2030*. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Produccio%CC%81n%20y%20consumo%20de%20litio%20hacia%20el%202030%20edicio%CC%81n%202021%20versi%C3%B3n%20ef.pdf>
- [3] Arentsen, G. W. (2020). *Nueva ruta de procesos para la obtencion de carbonato de litio grado tecnico mediante la reaccionreversible de Carbonato-Bicarbonato*. 74.
- [4] Brian W. Jaskula. (2013). *LITHIUM*. U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lithium-statistics-and-information>
- [5] Brian W. Jaskula. (2019). *LITHIUM*.
- [6] Butt, F. S., Lewis, A., Chen, T., Mazlan, N. A., Wei, X., Hayer, J., Chen, S., Han, J., Yang, Y., Yang, S., & Huang, Y. (2022). Lithium Harvesting from the Most Abundant Primary and Secondary Sources: A Comparative Study on Conventional and Membrane Technologies. *Membranes*, 12(4), 373. <https://doi.org/10.3390/membranes12040373>
- [7] C09 Committee. (2017). *Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0136-01>
- [8] Chi Tien. (2019). *Introduction to Adsorption. Basics, Analysis, and Application*. ELSEVIER.
- [9] Chitrakar, R., Kanoh, H., Miyai, Y., & Ooi, K. (2001). Recovery of Lithium from Seawater Using Manganese Oxide Adsorbent ($\text{H}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$) Derived from $\text{Li}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40(9), 2054-2058. <https://doi.org/10.1021/ie000911h>
- [10] D18 Committee. (2023). *Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0854-14>
- [11] Devakumar, D., Saravanan, K., Kannadasan, T., & Meenakshipriya, B. (2010). Mass Transfer Coefficient Studies in Bubble Column Reactor. *Modern Applied Science*, 4(7), p65. <https://doi.org/10.5539/mas.v4n7p65>
- [12] Dye, J. L. (2023). Lithium. En *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/lithium-chemical-element>
- [13] Estay, P. M. (2021). *Escasez hídrica en Chile y las proyecciones del recurso*. 7.
- [14] Fan, C., Shahid, M., & Pashley, R. M. (2018). The energy balance within a bubble column evaporator. *Heat and Mass Transfer*, 54(5), 1313-1321. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2234-x>
- [15] Félix Pérez. (2015). *Estimacion de la demanda actual, porecciones futuras y caracterizacion de la calidad de los recursos hidricos en Chile*. <https://dga.mop.gob.cl/Estudios/04%20Resumen%20Ejecutivo/Resumen%20Ejecutivo.pdf>
- [16] Gaikwad, R. W., & Misal, S. A. (2010). Sorption Studies of Methylene Blue on Silica Gel. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 342-345. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2010.V1.59>
- [17] Hoda Talebian, Hamid Niazmand, & Mahdi Mahdavihah. (2012). Effects of Adsorbent Particle Diameter on the Performance Parameters of Adsorption Chiller. *International Conference on Mechanical Engineering and Advanced Technology -ICMEAT 2012*. <https://profdoc.um.ac.ir/articles/a/1031277.pdf>
- [18] Igor Wilkomirsky. (2008). *Extraccion y refinacion de metales no Ferrosos -Litio*. Universidad de Concepcion - Chile.

- [19] INE. (2019). *Estimaciones y proyecciones de la poblacion de Chile 2002-2035 totales regionales, poblacion urbana y rural*. Instituto Nacional de Estadisticas. https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/proyecciones-de-poblacion/publicaciones-y-anuarios/base-2017/ine_estimaciones-y-proyecciones-2002-2035_base-2017_reg_%C3%A1rea_s%C3%ADntesis.pdf?sfvrsn=aaeb88e7_5
- [20] Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S. (2021). Surfactant Adsorption Isotherms: A Review. *ACS Omega*, 6(48), 32342-32348. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
- [21] Khalil, A., Mohammed, S., Hashaikh, R., & Hilal, N. (2022). Lithium recovery from brine: Recent developments and challenges. *Desalination*, 528, 115611. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115611>
- [22] Letzel, H. M., Schouten, J. C., Krishna, R., & Van Den Bleek, C. M. (1999). Gas holdup and mass transfer in bubble column reactors operated at elevated pressure. *Chemical Engineering Science*, 54(13-14), 2237-2246. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00418-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00418-7)
- [23] Lu, D., Ma, T., Lin, S., Zhou, Z., Li, G., An, Q., Yao, Z., Sun, Q., Sun, Z., & Zhang, L. (2021). Constructing a selective blocked-nanolayer on nanofiltration membrane via surface-charge inversion for promoting Li⁺ permselectivity over Mg²⁺. *Journal of Membrane Science*, 635, 119504. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119504>
- [24] Myers, A. L., & Monson, P. A. (2002). Adsorption in Porous Materials at High Pressure: Theory and Experiment. *Langmuir*, 18(26), 10261-10273. <https://doi.org/10.1021/la026399h>
- [25] Niazmand, H., Talebian, H., & Mahdavihah, M. (2013). Effects of particle diameter on performance improvement of adsorption systems. *Applied Thermal Engineering*, 59(1-2), 243-252. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.05.043>
- [26] Nishihama, S., Onishi, K., & Yoshizuka, K. (2011). Selective Recovery Process of Lithium from Seawater Using Integrated Ion Exchange Methods. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 29(3), 421-431. <https://doi.org/10.1080/07366299.2011.573435>
- [27] Oppliger, A., Höhl, J., Fragkou, M., Oppliger, A., Höhl, J., & Fragkou, M. (2019). Escasez de agua: Develando sus orígenes híbridos en la cuenca del Río Bueno, Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, 73, 9-27. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022019000200009>
- [28] Paula Guerra Pinto & Claudio Acuña Perez. (2021). *Metodo y sistema para evaporar agua desde piscinas de salmueras que comprende: Suministrar aire a poza de evaporacion; secar hasta hr 0% en columnas empacadas con silice gel; ajustar y controlar t° del aire seco y alimentacion de agua; suministrar aire a traves de un inyector; y retirar la salmuera concentrada*. (Patent 62821).
- [29] Ruthven, D. M. (1984). *Principles of adsorption and adsorption processes*. Wiley.
- [30] Salathiel González & Jorge Cantallopts. (2020). *Oferta y demanda de litio hacia el 2030*. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Produccion%20y%20consumo%20de%20litio%20hacia%20el%202030.pdf>
- [31] Salathiel González & Jorge Cantallopts. (2021). *Desarrollo reciente y proyecciones al 2030, Desarrollo reciente y proyecciones al 2030*. Cochilco. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Produccion%20y%20consumo%20de%20litio%20hacia%20el%202030.pdf>
- [32] Sayilgan, Ş. Ç., Mobedi, M., & Ülkü, S. (2016). Effect of regeneration temperature on adsorption equilibria and mass diffusivity of zeolite 13x-water pair. *Microporous and Mesoporous Materials*, 224, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.10.041>
- [33] Scott Patterson & Amrith Ramkumar. (2023, abril 4). *Lithium Prices Are Down, Cheaper Batteries and EVs Could Follow*. <https://www.wsj.com/articles/lithium-prices-are-down-cheaper-batteries-and-evs-could-follow-7a171fc0>
- [34] Somrani, A., Hamzaoui, A. H., & Pontie, M. (2013). Study on lithium separation from Salt Lake brines by nanofiltration (NF) and low-pressure reverse osmosis (LPRO). *Desalination*, 317, 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.03.009>

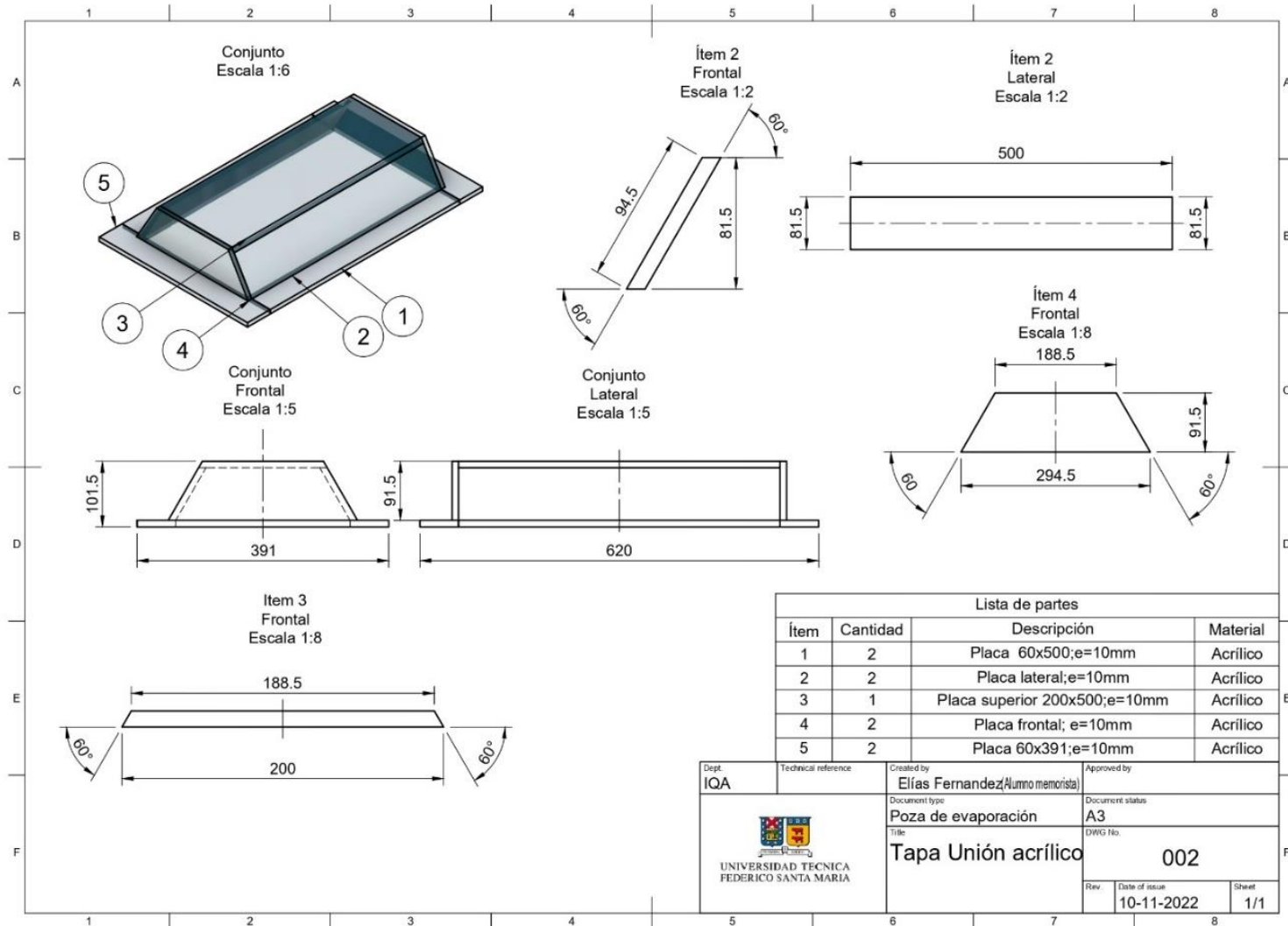
- [35] Stringfellow, W. T., & Dobson, P. F. (2021). Technology for the Recovery of Lithium from Geothermal Brines. *Energies*, 14(20), 6805. <https://doi.org/10.3390/en14206805>
- [36] Trading Economics. (2023). *Lithium* [Economico]. <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>
- [37] Wilkomirsky Igor. (2009, octubre 1). *Metalurgia extractiva dellitio*. pdfcoffee.com. <https://pdfcoffee.com/metalurgiaextractivadellitio01-10-2009-5-pdf-free.html>
- [38] Xu, S., Song, J., Bi, Q., Chen, Q., Zhang, W.-M., Qian, Z., Zhang, L., Xu, S., Tang, N., & He, T. (2021). Extraction of lithium from Chinese salt-lake brines by membranes: Design and practice. *Journal of Membrane Science*, 635, 119441. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119441>
- [39] Zhou, Z., Qin, W., Liu, Y., & Fei, W. (2012). Extraction Equilibria of Lithium with Tributyl Phosphate in Kerosene and FeCl₃. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 57(1), 82-86. <https://doi.org/10.1021/je200803h>
- [40] Zhu, X., Yue, H., Sun, W., Zhang, L., Cui, Q., & Wang, H. (2021). Study on adsorption extraction process of lithium ion from West Taijinar brine by shaped titanium-based lithium-ion sieves. *Separation and Purification Technology*, 274, 119099. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119099>

Anexo

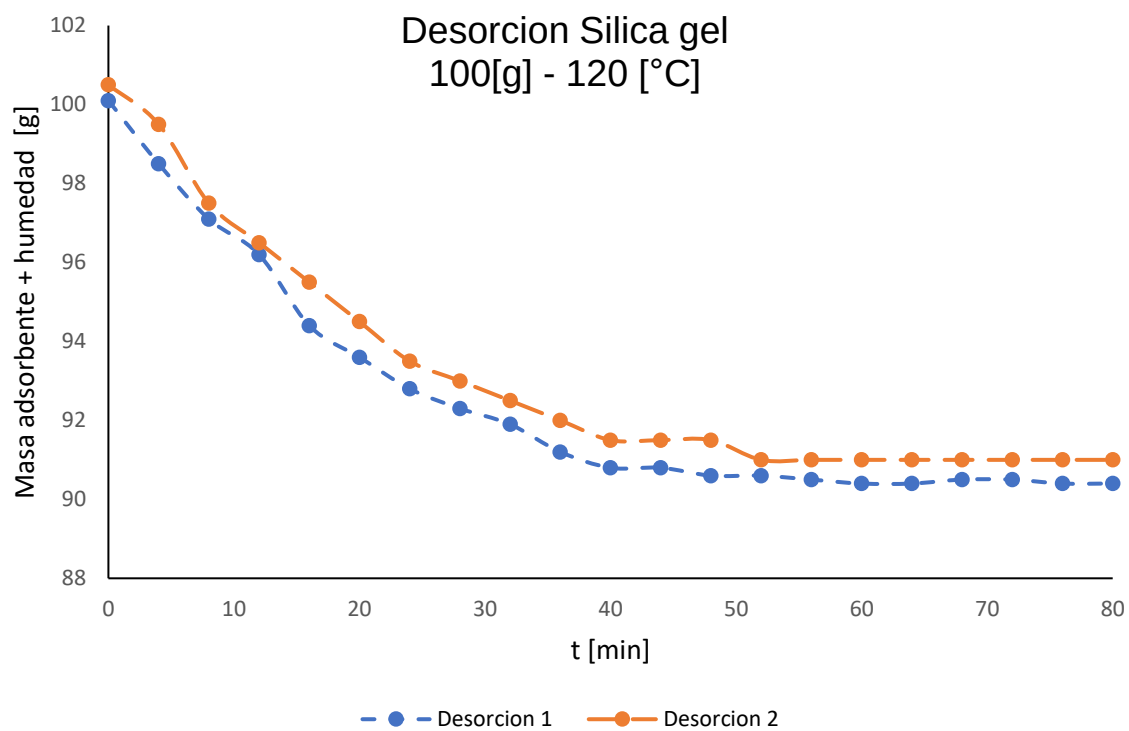
1.1 Diseño de pestaña con sellado hermético para baño termorregulado



1.2 Diseño del techo del estanque de evaporación



1.3 Prueba de desorción de la silica gel



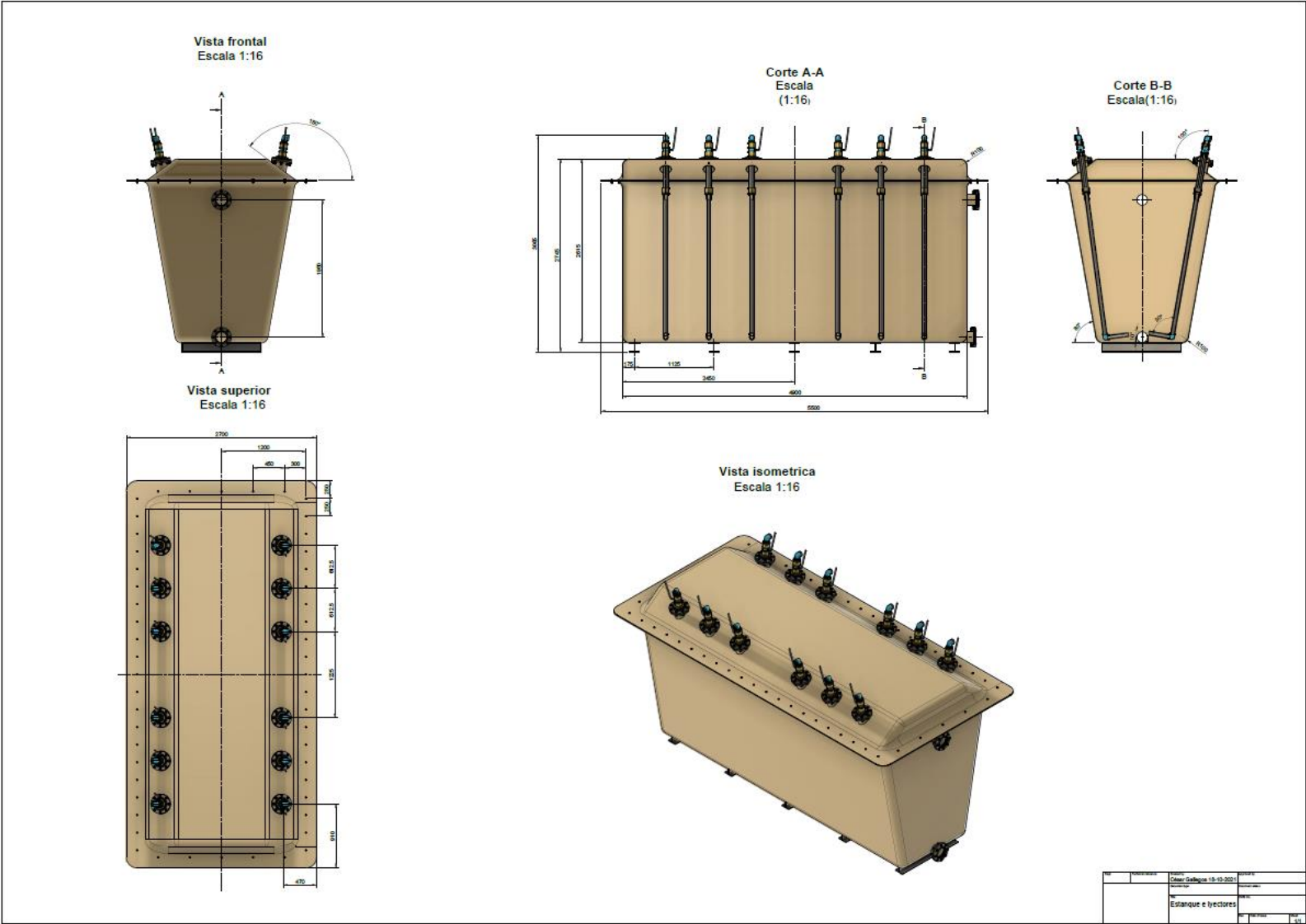
1.4 Resultados de la operación del prototipo a 20 °C

Flujo LPM	Diferencia de altura [mm]			Volumen evaporado [L]					Tasa de evaporación [L/m2dia]				
	Medición	Medición	Medición	Medición	Medición	Medición	D.V	Promedio	Medición	Medición	Medición	D.V	Promedio
	1	2	3	1	2	3			1	2	3		
50	0.5	1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.04	0.1	8	16	8	5	11
150	1.5	2	1	0.2	0.3	0.15	0.07	0.2	24	32	16	8	24
250	4	5	4	0.6	0.7	0.6	0.1	0.6	64	80	64	9	69

1.5 Resultados de la operación del prototipo a 40 °C

Flujo LPM	Diferencia de altura [mm]			Volumen evaporado [L]					Tasa de evaporación [L/m2dia]				
	Medición	Medición	Medición	Medición	Medición	Medición	D.V	Promedio	Medición	Medición	Medición	D.V	Promedio
	1	2	3	1	2	3			1	2	3		
50	1.0	1.5	1.0	0.1	0.2	0.1	0.04	0.2	16	24	16	4.6	18.7
150	5.0	4.0	5.0	0.7	0.6	0.7	0.1	0.7	80	64	80	9.2	74.7
250	6.0	6.0	5.5	0.9	0.9	0.8	0.04	0.8	96	96	88	4.6	93.3

1.6 Diseño del estanque evaporación a escala industrial



1.7 Características de la salmuera simulada

Cp H2O (40 °C)	4.179	[kJ/kg/K]
Cp H2O (20 °C)	4.182	[kJ/kg/K]
Cp AIRE (40 °C)	1.007	[kJ/kg/K]
Cp AIRE (20 °C)	1.007	[kJ/kg/K]
ρ AGUA (40°C)	992.2	[kg/m ³]
ρ AGUA (20°C)	998.2	[kg/ m ³]
Entalpia de evaporización	2388.8	[kJ/kg]
ρ AIRE (40 °C - 100% HR)	0.83	[kg/ m ³]
ρ AIRE (20 °C- 100% HR)	0.88	[kg/ m ³]
ρ AIRE (40 °C - 20% HR)	0.83	[kg/ m ³]
ρ AIRE (20 °C- 20% HR)	0.90	[kg/ m ³]
ρ AIRE (40 °C - 0,1% HR)	0.879507476	[kg/ m ³]
ρ AIRE (20 °C- 0,1% HR)	0.9	[kg/ m ³]
ρ Vapor	0.12	[kg/ m ³]

1.8 Flujo de caja para 100 estanques (tasa de descuento 12%)

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
INGRESOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Produccion litio (ton/año)		39000	43341	51417	60390	70260	81025	92687	105244	118698	133049
Precio Litio (USD/ton)		\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45
Ingresos por venta	\$0	\$367	\$408	\$484	\$569	\$662	\$763	\$873	\$991	\$1.118	\$1.253
Ingresos totales	\$0	\$367	\$408	\$484	\$569	\$662	\$763	\$873	\$991	\$1.118	\$1.253
EGRESOS											
Costos fijos	\$0	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267
Costos variables	\$0	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30
Depreciación	\$0	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201
Egresos totales	\$0	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498
Utilidades antes de impuesto	\$0	-\$131	-\$90	-\$14	\$71	\$164	\$265	\$375	\$493	\$620	\$755
Impuesto a las utilidades mineras (25%)	\$0	\$0	\$0	\$0	-\$18	-\$41	-\$66	-\$94	-\$123	-\$155	-\$189
Utilidad después de impuesto	\$0	-\$131	-\$90	-\$14	\$53	\$123	\$199	\$281	\$370	\$465	\$566
Depreciación	\$0	\$201	\$201	\$201	\$201	\$201	\$201	\$201	\$201	\$201	\$201
INVERSIONES											
Inversión en equipos e instalaciones	- \$4.016	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$6.024
Capital de trabajo	-\$149	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$149
FLUJO DE CAJA NETO	- \$4.166	\$70	\$111	\$187	\$254	\$324	\$400	\$482	\$571	\$666	\$6.941

1.9 Flujo de caja para 200 estanques (tasa de descuento 12%)

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
INGRESOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Produccion litio (ton/año)		39000	43341	51417	60390	70260	81025	92687	105244	118698	133049
Precio Litio (kUSD/ton)		\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45
Ingresos por venta	\$0	\$735	\$817	\$969	\$1.138	\$1.324	\$1.527	\$1.746	\$1.983	\$2.236	\$2.507
Ingresos totales	\$0	\$735	\$817	\$969	\$1.138	\$1.324	\$1.527	\$1.746	\$1.983	\$2.236	\$2.507
EGRESOS											
Costos fijos	\$0	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535
Costos variables	\$0	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60
Depreciación	\$0	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402
Egresos totales	\$0	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997
Utilidades antes de impuesto	\$0	-\$262	-\$180	-\$28	\$141	\$327	\$530	\$750	\$986	\$1.240	\$1.510
Impuesto a las utilidades mineras (25%)	\$0	\$0	\$0	\$0	-\$35	-\$82	-\$133	-\$187	-\$247	-\$310	-\$378
Utilidad después de impuesto	\$0	-\$262	-\$180	-\$28	\$106	\$245	\$398	\$562	\$740	\$930	\$1.133
Depreciación	\$0	\$402	\$402	\$402	\$402	\$402	\$402	\$402	\$402	\$402	\$402
INVERSIONES											
Inversión en equipos e instalaciones	- \$8.033	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$12.049
Capital de trabajo	-\$299	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$299
FLUJO DE CAJA NETO	- \$8.332	\$140	\$222	\$374	\$508	\$647	\$799	\$964	\$1.141	\$1.332	\$13.882

1.10 Flujo de caja para 400 estanques (tasa de descuento 12%)

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
INGRESOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Produccion litio (ton/año)		39000	43341	51417	60390	70260	81025	92687	105244	118698	133049
Precio Litio (USD/ton)		\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45
Ingresos por venta	\$0	\$1.470	\$1.633	\$1.938	\$2.276	\$2.648	\$3.053	\$3.493	\$3.966	\$4.473	\$5.014
Ingresos totales	\$0	\$1.470	\$1.633	\$1.938	\$2.276	\$2.648	\$3.053	\$3.493	\$3.966	\$4.473	\$5.014
EGRESOS											
Costos fijos	\$0	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069
Costos variables	\$0	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121
Depreciación	\$0	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803
Egresos totales	\$0	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993
Utilidades antes de impuesto	\$0	-\$524	-\$360	-\$56	\$282	\$654	\$1.060	\$1.499	\$1.973	\$2.480	\$3.020
Impuesto a las utilidades mineras (25%)	\$0	\$0	\$0	\$0	-\$71	-\$164	-\$265	-\$375	-\$493	-\$620	-\$755
Utilidad después de impuesto	\$0	-\$524	-\$360	-\$56	\$212	\$491	\$795	\$1.125	\$1.480	\$1.860	\$2.265
Depreciación	\$0	\$803	\$803	\$803	\$803	\$803	\$803	\$803	\$803	\$803	\$803
INVERSIONES											
Inversión en equipos e instalaciones	- \$16.065	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$24.098
Capital de trabajo	-\$598	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$598
FLUJO DE CAJA NETO	- \$16.663	\$280	\$443	\$748	\$1.015	\$1.294	\$1.598	\$1.928	\$2.283	\$2.663	\$27.764

1.11 Flujo de caja para 100 estanques (tasa de descuento 30%)

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
INGRESOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Produccion litio (ton/año)		39000	43341	51417	60390	70260	81025	92687	105244	118698	133049
Precio Litio (USD/ton)		\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45
Ingresos por venta	\$0	\$367	\$408	\$484	\$569	\$662	\$763	\$873	\$991	\$1.118	\$1.253
Ingresos totales	\$0	\$367	\$408	\$484	\$569	\$662	\$763	\$873	\$991	\$1.118	\$1.253
EGRESOS											
Costos fijos	\$0	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267	-\$267
Costos variables	\$0	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30	-\$30
Depreciación	\$0	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201	-\$201
Egresos totales	\$0	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498	-\$498
Utilidades antes de impuesto	\$0	-\$131	-\$90	-\$14	\$71	\$164	\$265	\$375	\$493	\$620	\$755
Impuesto a las utilidades mineras (25%)	\$0	\$0	\$0	\$0	-\$18	-\$41	-\$66	-\$94	-\$123	-\$155	-\$189
Utilidad después de impuesto	\$0	-\$131	-\$90	-\$14	\$53	\$123	\$199	\$281	\$370	\$465	\$566
Depreciación	\$0	\$201	\$201	\$201	\$201	\$201	\$201	\$201	\$201	\$201	\$201
INVERSIONES											
Inversión en equipos e instalaciones	-\$4.016	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$6.024
Capital de trabajo	-\$149	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$149
FLUJO DE CAJA NETO	-\$4.166	\$70	\$111	\$187	\$254	\$324	\$400	\$482	\$571	\$666	\$6.941

1.12 Flujo de caja para 100 estanques (tasa de descuento 30%)

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
INGRESOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Produccion litio (ton/año)		39000	43341	51417	60390	70260	81025	92687	105244	118698	133049
Precio Litio (kUSD/ton)		\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45
Ingresos por venta	\$0	\$735	\$817	\$969	\$1.138	\$1.324	\$1.527	\$1.746	\$1.983	\$2.236	\$2.507
Ingresos totales	\$0	\$735	\$817	\$969	\$1.138	\$1.324	\$1.527	\$1.746	\$1.983	\$2.236	\$2.507
EGRESOS											
Costos fijos	\$0	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535	-\$535
Costos variables	\$0	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60	-\$60
Depreciación	\$0	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402	-\$402
Egresos totales	\$0	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997	-\$997
Utilidades antes de impuesto	\$0	-\$262	-\$180	-\$28	\$141	\$327	\$530	\$750	\$986	\$1.240	\$1.510
Impuesto a las utilidades mineras (25%)	\$0	\$0	\$0	\$0	-\$35	-\$82	-\$133	-\$187	-\$247	-\$310	-\$378
Utilidad después de impuesto	\$0	-\$262	-\$180	-\$28	\$106	\$245	\$398	\$562	\$740	\$930	\$1.133
Depreciación	\$0	\$402	\$402	\$402	\$402	\$402	\$402	\$402	\$402	\$402	\$402
INVERSIONES											
Inversión en equipos e instalaciones	- \$8.033	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$12.049
Capital de trabajo	-\$299	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$299
FLUJO DE CAJA NETO	- \$8.332	\$140	\$222	\$374	\$508	\$647	\$799	\$964	\$1.141	\$1.332	\$13.882

1.13 Flujo de caja para 100 estanques (tasa de descuento 30%)

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
INGRESOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Produccion litio (ton/año)		39000	43341	51417	60390	70260	81025	92687	105244	118698	133049
Precio Litio (USD/ton)		\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45	\$ 45
Ingresos por venta	\$0	\$1.470	\$1.633	\$1.938	\$2.276	\$2.648	\$3.053	\$3.493	\$3.966	\$4.473	\$5.014
Ingresos totales	\$0	\$1.470	\$1.633	\$1.938	\$2.276	\$2.648	\$3.053	\$3.493	\$3.966	\$4.473	\$5.014
EGRESOS											
Costos fijos	\$0	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	- \$1.069	-\$1.069
Costos variables	\$0	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121	-\$121
Depreciación	\$0	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803	-\$803
Egresos totales	\$0	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	- \$1.993	-\$1.993
Utilidades antes de impuesto	\$0	-\$524	-\$360	-\$56	\$282	\$654	\$1.060	\$1.499	\$1.973	\$2.480	\$3.020
Impuesto a las utilidades mineras (25%)	\$0	\$0	\$0	\$0	-\$71	-\$164	-\$265	-\$375	-\$493	-\$620	-\$755
Utilidad después de impuesto	\$0	-\$524	-\$360	-\$56	\$212	\$491	\$795	\$1.125	\$1.480	\$1.860	\$2.265
Depreciación	\$0	\$803	\$803	\$803	\$803	\$803	\$803	\$803	\$803	\$803	\$803
INVERSIONES											
Inversión en equipos e instalaciones	- \$16.065	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$24.098
Capital de trabajo	-\$598	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$598
FLUJO DE CAJA NETO	- \$16.663	\$280	\$443	\$748	\$1.015	\$1.294	\$1.598	\$1.928	\$2.283	\$2.663	\$27.764

